Meetfouten bij elektrische metingen

'*Weten is meten*' is een bekende uitdrukking in de techniek. Maar in de praktijk blijkt vaak dat een meting, zelfs met een nauwkeurige meter, niet per definitie betrouwbaar is. Er kunnen nogal wat meetfouten optreden waarmee u rekening moet houden.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: verstraten-1947@outlook.com
Publicatiedatum: 31-05-2025

Inleidende begrippen

De multimeter en de oscilloscoop, onmisbare instrumenten
Inderdaad, zonder deze twee meetinstrumenten is iedere praktijk-elektronicus zo blind als een mol. Met een multimeter kunt u de waarde van een spanning, stroom, weerstand of condensator vergelijken met wat deze zou moeten zijn. Met een oscilloscoop ziet u precies hoe een signaal er uitziet.
Die apparaten worden, dank zij Chinese fabrikanten, steeds beter en goedkoper. U kunt nu bijvoorbeeld een digitale multimeter, de ZT-225 van ZOYI, met een aantal counts van 25.000 en een nauwkeurigheid van ±[0,05 % + 3] voor een prijs van € 37,59 via AliExpress bestellen. Tien jaar geleden zou een multimeter met dergelijke specificaties semi-professioneel worden genoemd en honderden euro's kosten. Hetzelfde geldt voor oscilloscopen waar u voor € 250,00 al een uitstekend apparaat met een bandbreedte van 100 MHz en 10 bit resolutie kunt aanschaffen.
Het lijkt er dus op alsof u, met zo'n twee apparaten, alle grootheden in een elektronische schakeling met een grote betrouwbaarheid kunt meten. Maar zelfs met die multimeter met een nauwkeurigheid van ±[0,05 % + 3] kunt u spanningen, stromen, weerstanden en capaciteiten foutief meten.

Resolutie, nauwkeurigheid en precisie van een multimeter
Maar eerst is het misschien noodzakelijk wat begrippen waarmee de fabrikanten van digitale multimeters u om de oren slaan even heel precies te definiëren.

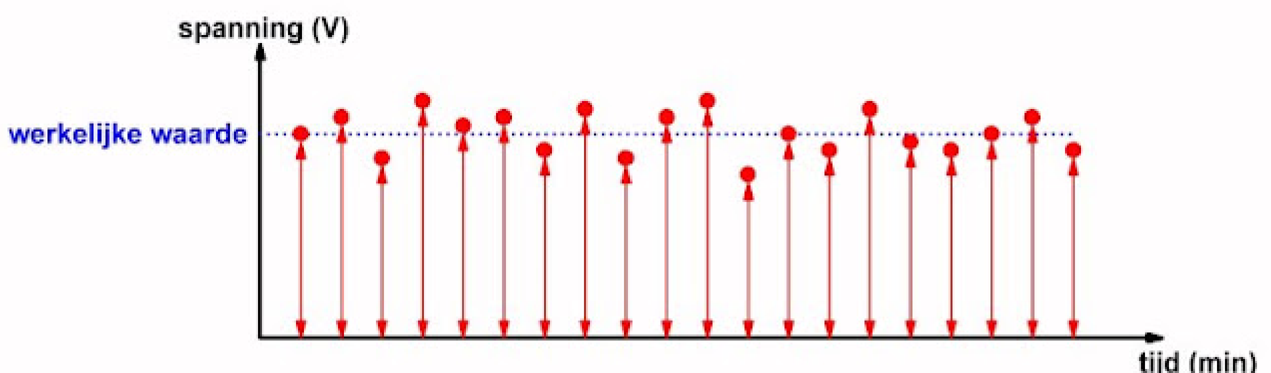
De resolutie van een multimeter
De resolutie geeft de kleinste nog te onderscheiden waardeverandering van de gemeten grootheid aan. De resolutie is geen constant gegeven, maar afhankelijk van het aantal counts waarover de meter beschikt en van het gekozen meetbereik.
Stel dat uw meter 19999 counts heeft en u het apparaat op een meetbereik van 19,999 V hebt gezet. De resolutie bedraagt dan 1 mV. Als het meest rechtse cijfer van de uitlezing met één eenheid verspringt komt dit immers overeen met een meetvariatie van ±1 mV. Schakelt u echter om naar een meetbereik van 199,99 V, dan wordt de resolutie gelijk aan ±10 mV.
De resolutie wordt ook wel het '*oplossend vermogen*' genoemd.

De nauwkeurigheid van een multimeter
De nauwkeurigheid van een multimeter geeft een indicatie over de accuraatheid van een meting, ofwel hoe groot de afwijking is tussen de gemeten en de werkelijke waarde. Die parameter wordt altijd aangeduid door de notatie:
±[A % + B]

- A:
  Geeft de procentuele fout, dit is dus een percentage van de gemeten waarde. Stel dat bij een bepaalde meter A gelijk is aan 1,2. Als uw meter een spanning weergeeft als 100,00 V, dan is ±1,2 % daarvan gelijk aan ±1,2 V.
- B:
  Geeft de volle schaal onzekerheid. Die factor wordt bepaald door de eigenschappen van de multimeter en wordt weergegeven door een dimensieloos getal. Dit geeft aan welke spreiding er kan zitten op de indicatie van het meest rechtse cijfer van het display. Stel dat bij uw meter met een aantal counts van 19999 de waarde van B gelijk is aan 10. U stelt het meetbereik in op 199,99 V. Het rechter digit komt, in het gekozen meetbereik, overeen met 10 mV. De B waarde van tien geeft een extra meetonzekerheid van 10 • ±10 mV is gelijk aan ±0,1 V. Deze meetfout hangt dus niet af van de grootte van de spanning die wordt gemeten maar uitsluitend van het meetbereik en van het aantal counts van de meter.

De totale meetnauwkeurigheid is de som van de A-fout en de B-fout. In het besproken voorbeeld wordt de totale meetfout dus:
±1,2 V + ±0,1 V = ±1,3 V
Als uw meter exact 100,00 V aanduidt kan de werkelijke waarde van de gemeten spanning ergens liggen tussen de waarden 98,7 V en 101,3 V.

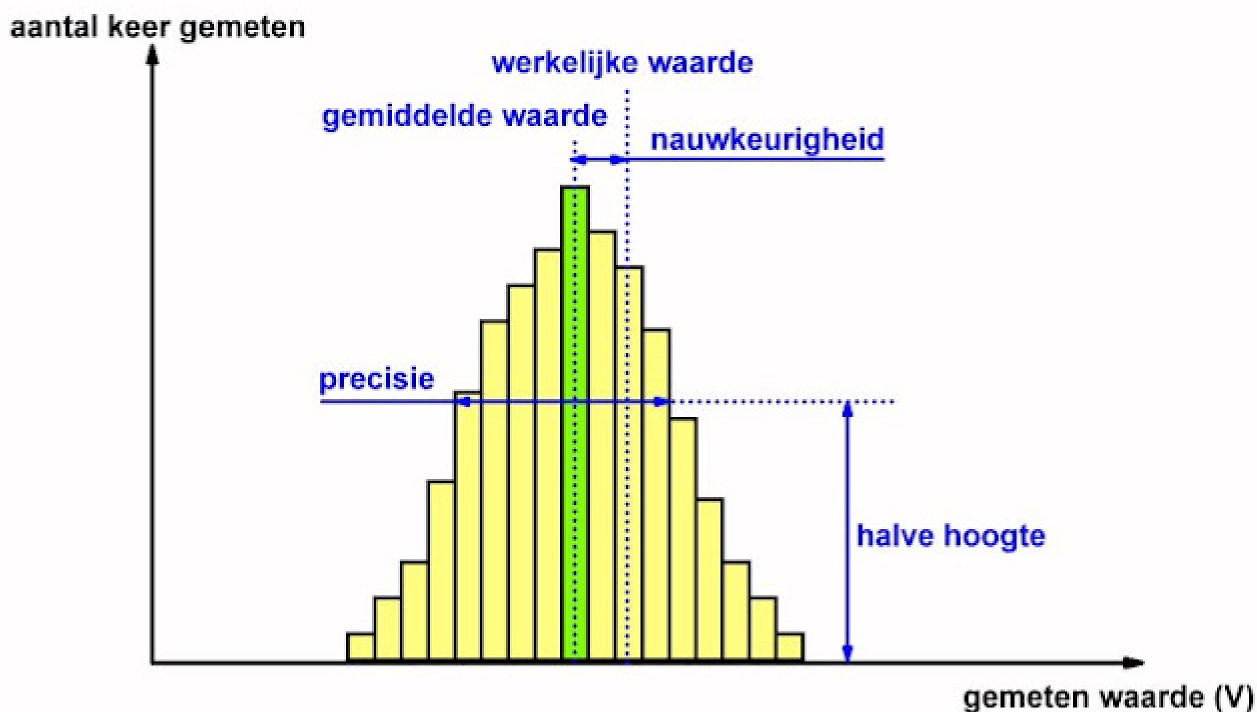
De precisie van een multimeter
De begrippen nauwkeurigheid en precisie worden vaak door elkaar gebruikt. Ten onrechte, want de precisie van een meting is iets geheel anders dan de nauwkeurigheid van een meting. Stel dat u beschikt over een zeer nauwkeurige spanningsreferentie die 5,000 V_{dc} levert. Als u honderd keer om de minuut deze spanning meet met uw multimeter zult u vaststellen dat deze metingen onderling een bepaalde variatie vertonen. U zult in ieder geval geen honderd keer precies 5,000 V op het display zien verschijnen. Dit is voorgesteld in de onderstaande figuur waar de horizontale as de tijdschaal weergeeft en de verticale as de afwijking in de metingen.



Een reeks metingen van een zeer stabiele grootheid. (© 2025 Jos Verstraten)

Die afwijkingen worden veroorzaakt door volledig willekeurige effecten, zoals:
- thermische ruis in de meetopstelling
- plotselinge EMC-storingen
- een piekje op de netspanning
- jitter op de klokfrequentie die de ADC in de multimeter aanstuurt.

U kunt nu die meetgegevens omzetten in een histogram met op de horizontale as de waarde van uw metingen en op de verticale as het aantal keer dat die metingen voorkomen. Dat is getekend in de onderstaande figuur. Eén meetwaarde komt het vaakst voor en dat noemt men de '*gemiddelde waarde*' van de metingen. Naarmate de gemeten waarde daalt of stijgt ten opzichte van de gemiddelde waarde neemt het aantal metingen af. Het typisch verloop van zo'n curve noemt men een '*gaussische verdeling*'.
De precisie van de meting is nu gelijk aan de breedte van de curve op de helft van de totale hoogte van de curve.



De honderd metingen omgezet in een histogram. (© 2025 Jos Verstraten)

Gekalibreerde, geijkte en gejusteerde multimeters
Drie begrippen die u ook vaak tegenkomt in advertenties over het betere soort multimeters en die duidelijk moeten worden gedefinieerd.

'*Wordt ook geleverd met kalibratie certificaat*'
Sommige meetinstrumenten kunt u kopen zonder of mét een kalibratie certificaat. Voor die laatste optie moet u flink dieper in de buidel tasten. Maar wat stelt een kalibratie certificaat eigenlijk voor? Dat is een papiertje waarop het resultaat van een aantal metingen is vermeld. Die metingen zijn uitgevoerd met de specifieke meter onder gestandaardiseerde condities van omgevingstemperatuur, luchtvochtigheid, etc. Ook wordt de datum en de tijd van de metingen vermeld. Wat gemeten wordt hangt uiteraard af van het soort meter dat wordt gekalibreerd. Bij een digitale multimeter kan men een uiterst stabiele spanningsreferentie meten, een referentiestroom en een uiterst stabiele weerstand met een tolerantie van ±0,1 %. Ook de geconstateerde afwijkingen worden vastgelegd in het certificaat. Er worden dus geen ingrepen in het instrument verricht!
Er bestaan gespecialiseerde bedrijven waar u uw meetapparatuur bijvoorbeeld ieder jaar opnieuw kunt laten kalibreren. Op deze manier houdt u in de gaten of uw multimeter nog wel voldoet aan de in de specificaties vermelde nauwkeurigheid.

Wat is een geijkte multimeter?
Dat is een meter die een speciale keurig heeft ondergaan waarbij niet alleen wordt gekeken naar de nauwkeurigheid van het apparaat, maar ook of het instrument voldoet aan alle wettelijk voorgeschreven eisen. Net zoals bij een kalibratie wordt niet ingegrepen in het apparaat. In Nederland mag een keuring van een meetapparaat alleen worden uitgevoerd door een daartoe bevoegde instantie. Wie dat precies mag doen, hangt af van het type meetapparaat en de wettelijke eisen die erop van toepassing zijn. Geijkte meetinstrumenten worden voorzien van een sticker waarop de datum van de ijking is vermeld.

Wat is een gejusteerde multimeter?
Justeren, een ingewikkeld woord voor afregelen, is het verrichten van werkzaamheden in een meetinstrument om dit zo nauwkeurig mogelijk te laten functioneren. Bij het justeren worden dus wél ingrepen gepleegd in het meetinstrument. In de meeste gevallen kan dit dan ook alleen uitgevoerd worden door de fabrikant van het apparaat. Het justeren wordt meestal gedaan aan de hand van een kalibratie vooraf waaruit blijkt dat het meetinstrument '*uit zijn specificaties is gelopen*'. Na het justeren moet het apparaat opnieuw gekalibreerd worden. In

een goed kalibratie certificaat staan zowel de meetresultaten van voor en na het justeren vermeld.

Fouten bij digitale multimeter metingen
Bij het meten met een digitale multimeter kunnen meetfouten ontstaan door:
- de ingangsweerstand van de multimeter
- de shuntweerstand in de multimeter
- contactweerstanden
- de beperkte bandbreedte van de multimeter
- de ingangscapaciteit bij wisselspanningsmeting
- de te grote waarde van de crest-factor
- het meetprincipe van condensatoren

Fouten bij analoge multimeter metingen
Ja, er zijn nog mensen die analoge meters gebruiken! Denk maar aan de mV-meters voor wisselspanning, die vrijwel allemaal nog analoog werken. Ook bij deze meters kan zich een typische fout voordoen door:
- de parallax van de aflezing

Fouten bij oscilloscoop metingen
Als u een signaal observeert met uw oscilloscoop kunnen fouten optreden door:
- de beperkte bandbreedte
- de beperkte resolutie
- de te lage ingangsimpedantie
- te lage sampling-rate (aliasing fouten)
- slechte impedantie-aanpassing (kabelreflecties)
- de looptijden van signalen
- te lage waveform capture rate
- de beeldinterpolatie

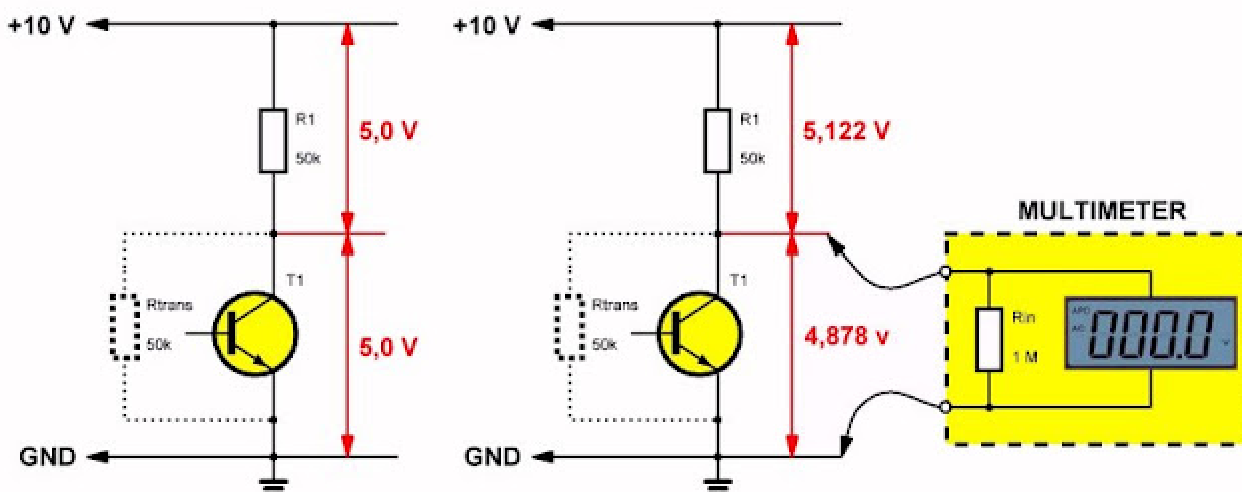
Fouten door gebruik van 1/10-meetprobes
Iedere oscilloscoop wordt geleverd met meetprobes die u kunt omschakelen van 1/1 naar 1/10. Bij het gebruik van een dergelijke probe kunnen fouten optreden door:
- verkeerde instelling op de oscilloscoop
- verkeerde compensatie van de probe
- frequentiebereik van de probe
- capacitieve belasting door de probe
- onjuiste massaverbinding van de probe

Fouten die bij alle metingen kunnen optreden
Deze fouten hebben te maken met de omgeving waarin u meet:
- fouten door EMI/RFI-interferentie
- fouten als gevolg van aardlussen
- fouten door common-mode spanningen
- fouten door het tribo-elektrisch effect
- fouten door het thermo-elektrisch effect
- fouten door elektrochemische effecten
- fouten door gereflecteerde stoorsignalen

Meetfouten bij digitale multimeter metingen

Meetfouten door de ingangsweerstand van de multimeter
De ingangsweerstand van een multimeter bij het meten van gelijkspanningen is een van de belangrijkste specificaties van het apparaat! De ingangsweerstand bepaalt namelijk in hoge mate of de gemeten spanning op een punt wel gelijk is aan de spanning die op dat punt

aanwezig is zonder aangesloten meter. In de onderstaande figuur is links een praktische meetsituatie weergegeven. Op de collector van een transistor T1 staat een spanning van 5,0 V. De schakeling wordt gevoed met 10 V en de collectorweerstand is 50 kΩ. Uit deze gegevens volgt dat de virtuele weerstand van de geleidende transistor ook 50 kΩ is. Deze is gestippeld getekend. Over beide identieke weerstanden valt dan dezelfde spanning, dus de helft van de voedingsspanning.

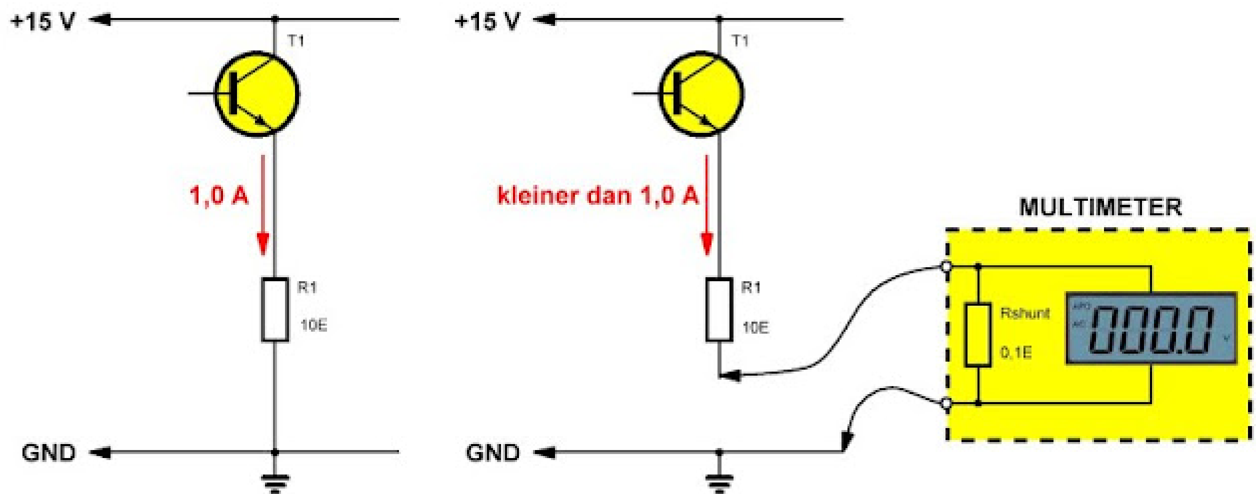


Beïnvloeding van de spanning op een punt door het aansluiten van een multimeter.
(© 2025 Jos Verstraten)

Nu gaat u de collectorspanning meten met een digitale multimeter die een inwendige weerstand heeft van 1 MΩ. Die situatie in rechts geschetst. Over de 50 kΩ weerstand van de transistor komt nu de 1 MΩ weerstand van de meter parallel te staan. De vervangingsweerstand van die twee parallel geschakelde weerstanden is 47,62 kΩ. De spanningsdeler tussen de 10 V voeding en de GND komt er nu anders uit te zien, een bovenste weerstand van nog steeds 50 kΩ en een onderste weerstand van 47,62 kΩ. Dat betekent dat ook de spanningsverdeling anders wordt. Over de bovenste weerstand valt 5,122 V, over de onderste 4,878 V.
Het resultaat van het aansluiten van de multimeter op de collector is dat de spanning op die collector daalt van 5,0 V naar 4,878 V.
Besluit van dit verhaal is dat een hoge resolutie multimeter met een hoge nauwkeurigheid een zo groot mogelijke ingangsweerstand moet hebben. De meeste goedkope multimeters hebben een ingangsweerstand van 10 MΩ. In het getekende voorbeeld zou de gemeten collectorspanning dan gelijk worden aan 4,987 V.
Professionele multimeters, zoals onze Fluke 8842A met 199999 counts en met een nauwkeurigheid van ±0,01 %, hebben zelfs een nog hogere ingangsweerstand, namelijk 10.000 MΩ! Bij een lagere waarde zouden die hoge resolutie en nauwkeurigheid zinloos worden.
BESLUIT:
Bij het meten van gelijkspanningen met een digitale multimeter zal de gemeten spanning ten opzichte van de massa meestal iets lager zijn dan de reële spanning op het meetpunt.

Meetfouten door de shuntweerstand in de multimeter
Deze fouten ontstaan als u de stroom die door een onderdeel vloeit wilt meten. In de onderstaande figuur is links de te meten situatie getekend. Door een emittervolger T1 zou een stroom van 1 A moeten vloeien en het is de bedoeling dat u de waarde van die stroom gaat controleren. Dat kan alleen door de verbinding tussen de weerstand R1 en de massa te onderbreken en op die plaats de multimeter aan te sluiten. Als dat apparaat is ingesteld op het meten van gelijkstromen staat er tussen de twee meetklemmen een zeer kleine shuntweerstand. In het voorbeeld gaan wij uit van een weerstand van 0,1 Ω. De interne elektronica van de multimeter meet de gelijkspanning die over deze weerstand ontstaat en berekent de corresponderende stroom met de wet van ohm. Die waarde verschijnt op het

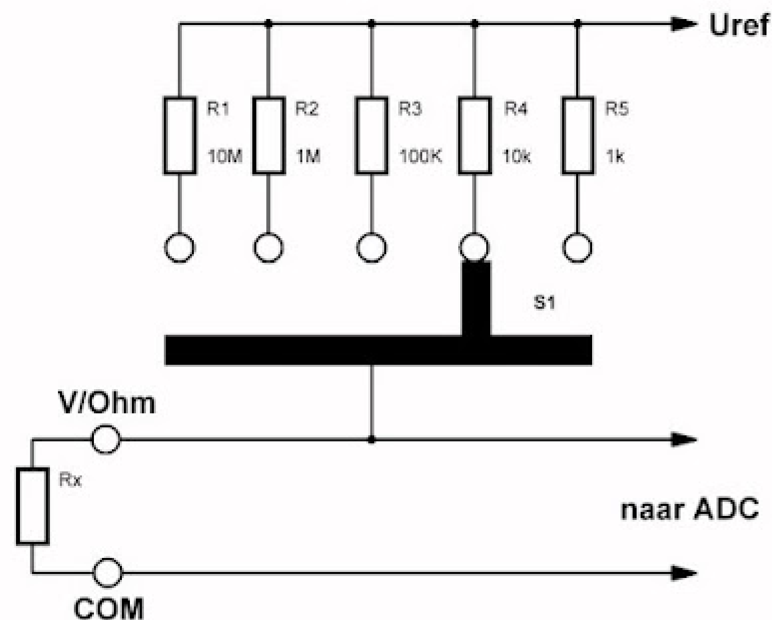
display.



Beïnvloeding van de stroom door een onderdeel door het aansluiten van een multimeter.
(© 2025 Jos Verstraten)

Door het in de schakeling opnemen van uw multimeter verandert echter de instelling van de transistor T1. De emitterweerstand die 10 Ω was wordt nu 10,1 Ω. Dit lijkt een vrij onbeduidend verschil, maar het gaat toch om een variatie met 1 %. Het gevolg is dat de stroom die door de transistor T1 en de weerstand R1 vloeit kleiner wordt.
Om die beïnvloeding van de schakeling zo miniem mogelijk te houden is het dus van belang de shuntweerstand in de multimeter zo klein mogelijk te maken. De waarde van de shuntweerstand is niet constant, maar afhankelijk van het meetbereik. Vandaar dat u die gegevens nooit in de specificaties zult aantreffen. In plaats daarvan heeft men het over de '*burden-spanning*'. Dat is de spanning die over de shuntweerstand valt als de gemeten stroom gelijk is aan de maximale waarde van het ingestelde stroombereik.
BESLUIT:
Bij het meten van stromen met een digitale multimeter zal de gemeten stroom meestal iets lager zijn dan de reële stroom die door het meetpunt vloeit.

Meetfouten door contactweerstanden
Deze fouten treden op als u weerstanden met uw multimeter wilt meten. Het meetprincipe heet de '*ratiometing*'. De te meten weerstand wordt in serie met een nauwkeurig bekende weerstand aangesloten op de interne referentiespanning U_{ref}. De ADC in uw multimeter meet de spanningsval over de onbekende weerstand. Omdat de referentiespanning en de serieweerstand bekend zijn kan uit de meting van de spanningsval de waarde van de te meten weerstand worden afgeleid. Voor ieder meetbereik wordt een andere nauwkeurige weerstand in serie met de te meten weerstand ingeschakeld.
Dit is een betrouwbare en zeer nauwkeurige meetmethode als het gaat over weerstanden in het kΩ en MΩ bereik. Als u echter zeer kleine weerstanden meet introduceert deze methode aanzienlijke fouten. Het nadeel van deze methode is namelijk dat de weerstand van de meetsnoeren en de contactweerstanden van de banaanstekkers in de ingangsconnectoren mee worden gemeten. Die parasitaire weerstanden kunnen gemakkelijk een paar tienden van een ohm bedragen.



Het 'ratiometer-principe' waarmee multimeters weerstanden meten.
(© 2025 Jos Verstraten)

Als u zeer lage weerstanden moet meten sluit u eerst de meetpennen kort en noteert de waarde van de totale parasitaire weerstand. Nadien meet u de te meten weerstand en trekt van het meetresultaat de totale parasitaire weerstand af. Multimeters van het betere soort hebben een '*REL*'-functie waarbij de meter die aftrekking automatisch doet.
BESLUIT:
Bij het meten van zeer lage weerstanden zal een multimeter altijd een iets hogere waarde meten dan de reële waarde van de weerstand.

Meetfouten door de beperkte bandbreedte van de multimeter
Deze fouten treden op bij het meten van wisselspanningen en -stromen. Goedkope multimeters hebben een zeer beperkte bandbreedte. Vaak kunt u nauwkeurig meten tot slechts een paar kHz, dus niet eens in het volledige audio-gebied. De meetfouten nemen boven een bepaalde frequentie bovendien zeer snel toe. Als voorbeeld ziet u in de onderstaande tabel de fouten die optreden bij de XDM1041 tafelmultimeter van OWON. De uitlezing bij 50 Hz werd als referentie genomen.

SIGNAALFREQUENTIE 1 V_{eff} SINUS	UITLEZING OWON XDM1041	PROCENTUELE AFWIJKING
10 Hz	1,0015 V_{eff}	0,0 %
50 Hz	1,0015 V_{eff}	---
100 Hz	1,0014 V_{eff}	-0,01 %
1 kHz	1,0012 V_{eff}	-0,03 %
5 kHz	0,9691 V_{eff}	-3,2 %
6 kHz	0,9252 V_{eff}	-7,6 %
7 kHz	0,7451 V_{eff}	-25,6 %

Fouten bij het meten van wisselspanningen met de XDM1041 van OWON.
(© 2025 Jos Verstraten)

Meetfouten door de ingangscapaciteit bij wisselspanningsmeting
Bij het meten van wisselspanning moet u er rekening mee houden dat er tussen de ingang van de multimeter en de '*COM*' een bepaalde parasitaire capaciteit C_{in} aanwezig is. Deze

heeft een impedantie, een wisselstroom weerstand, die afhankelijk is van de frequentie. Deze staat parallel aan de R_{in} van de meter en zorgt er dus voor dat de ingangsweerstand bij het meten van wisselspanning veel lager is dan deze bij het meten van gelijkspanning. Om de frequentie-afhankelijke invloed van deze capaciteit zo klein mogelijk te maken kiest men er meestal voor om de ingangsweerstand voor wisselspanning te verlagen tot 1 MΩ. De wisselspanningsdaling die optreedt op een punt door het meten op dat punt is dus veel groter dan het geval is bij het meten van gelijkspanningen.

Meetfouten door de te grote waarde van de crest-factor

Vrijwel alle moderne multimeters, zelfs de allergoedkoopste, meten de effectieve waarde van wisselspanningen. Dat noemt men '*true-RMS*' meting. De effectieve waarde (of RMS-waarde, van **R**oot **M**ean **S**quare) van een wisselspanning is gelijk aan de waarde van een gelijkspanning die dezelfde hoeveelheid warmte genereert in een weerstand als de wisselspanning.

De processor in de multimeter kan die effectieve waarde van de gemeten wisselspanning gemakkelijk berekenen als die spanning netjes sinusvormig van vorm is. Maar tegenwoordig zult u vaak wisselspanningen aantreffen in vermogenselektronica die alles behalve sinusvormig zijn. De '*crest-factor*' C_r (ook wel piekfactor genoemd) van een spanning is een maat voor de verhouding tussen de piekwaarde (de maximale amplitude) en de effectieve waarde van dat signaal. De formule is:

C_r = piekwaarde / RMS-waarde

Voor een zuivere sinusvormige wisselspanning is de crest-factor gelijk aan 1,414. Voor andersvormige wisselspanningen kan de crest-factor echter nogal afwijken van deze waarde. Een hoge crest-factor betekent dat er relatief grote pieken in de wisselspanning aanwezig zijn. Een rechthoekige puls met smalle pieken kan een crest-factor hebben van wel tien of hoger. Dergelijke wisselspanningen komt u tegenwoordig vaak tegen, bijvoorbeeld in gedimde LED-verlichting waarbij de lichtsterkte geregeld wordt door pulsbreedte modulatie.

De meeste goedkope multimeters zijn niet in staat wisselspanningen met hoge crest-factoren nauwkeurig te meten. De gespecificeerde nauwkeurigheid bij het meten van wisselspanning neemt dan heel snel af. Denk daar dus aan als u spanningen meet in triac-gestuurde dimmers of vermogensregelingen die met pulsbreedte modulatie (PWM) werken.

Meetfouten door het meetprincipe van condensatoren

Vrijwel alle multimeters meten condensatoren door de ladingswet toe te passen. Het principe is geschetst in de onderstaande figuur. De te meten condensator C_x wordt aangesloten op een elektronische omschakelaar S1. In de getekende stand wordt de condensator ontladen via de weerstand R1 met de ontlaadstroom $I_{ontlaad}$ tot hij volledig is ontladen. De meter schakelt even later de schakelaar S1 om en de te meten condensator wordt nu geladen met een zeer constante stroom I_{laad}, geleverd door een zeer stabiele stroombron. Dit laden gaat door tot de spanning over de condensator tot een bepaalde waarde U_{ref} is gestegen. Op dit moment stuurt de meetschakeling de elektronische schakelaar weer naar de onderste stand. De tijd die noodzakelijk is om de condensator op te laden van 0 V tot de referentiewaarde U_{ref} is recht evenredig met de waarde van het onderdeel. Immers, uit de elektriciteitsleer weet u:

$Q = U \cdot C$

De lading Q in een condensator is gelijk aan de capaciteit C van de condensator vermenigvuldigd met de spanning U over het onderdeel.

Maar ook:

$Q = I \cdot t$

De lading Q in een condensator is gelijk aan de stroom die I in de condensator vloeit, vermenigvuldigd met de tijd t dat deze stroom vloeit.

Dus is:

$U \cdot C = I \cdot t$

Of:

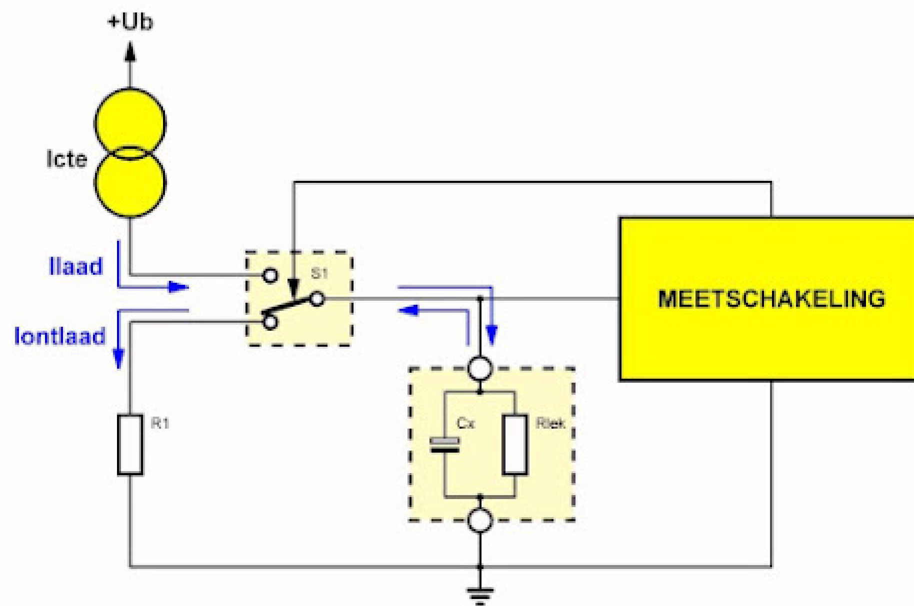
$C = [I \cdot t] / U$

$= [I / U] \cdot t$

$= cte \cdot t$

Bij de besproken schakeling zijn immers de laadstroom I_{laad} en de referentiespanning U_{ref} constant. Er bestaat dus inderdaad een recht evenredig verband tussen de waarde C van de

condensator en de laadtijd t die nodig is om de volledig ontladen condensator met een constante stroom op te laden tot de referentiespanning. Door deze tijd t te meten kan de processor in uw multimeter de waarde van de condensator berekenen en op het display zetten.



Het principe van het meten van condensatoren met multimeters.
(© 2025 Jos Verstraten)

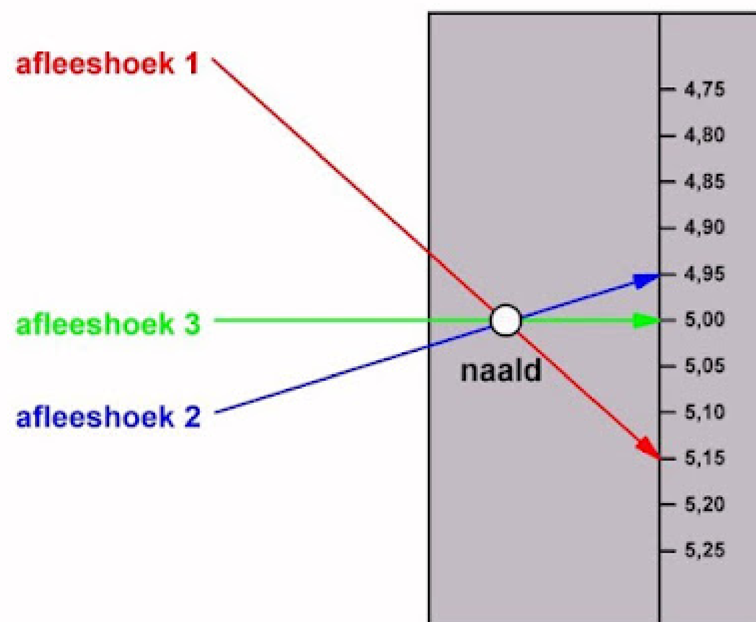
Dit systeem werkt uitstekend en zeer nauwkeurig als u niet-elektrolytische condensatoren meet. Deze hebben namelijk een volledig te verwaarlozen lekstroom. Elco's hebben dat niet en die grote lekstroom kunt u voorstellen door een parasitaire weerstand R_{lek} die parallel over de condensator C_x staat (zie bovenstaand schema). Door deze weerstand gaat uiteraard ook een stroom vloeien, de lekstroom van de condensator. Omdat de stroombron een constante stroom levert wordt deze lekstroom afgetrokken van de stroom die door de ideale condensator C_x vloeit. De laadtijd van de condensator wordt in de praktijk dus beïnvloed door de grootte van de lekstroom. Omdat een deel van de laadstroom afvloeit via de lekweerstand zal het langer duren alvorens de condensator tot U_{ref} is opgeladen. Uw multimeter zal dus een hogere capaciteitswaarde melden dan de echte waarde van de elco.
Meet u bovendien twee elco's met identieke capaciteiten die echter uiteenlopende lekstromen hebben, dan zal uw digitale multimeter twee verschillendecapaciteitswaarden op het display zetten.
Dat die fout aardig kan oplopen bewijst de onderstaande tabel. Wij meten drie elco's van 10 µF, 100 µF en 1.000 µF met onze nauwkeurige meetbrug ET4401 en met de multimeter XDM1041 van OWON. Die meetbrug meet condensatoren volgens een geheel ander principe en heeft geen last van de lekstromen. U ziet dat de OWON steeds een hogere waarde meet.
BESLUIT:
Bij het meten van elco's zal een multimeter vrijwel steeds een hogere waarde aanduiden dan de reële waarde van de condensator.

GEMETEN MET EASTTESTER ET4401	GEMETEN MET OWON XDM1041
8,940 µF	10,09 µF
92,53 µF	97,7 µF
902,1 µF	907 µF

De vrij grote meetfout bij het meten van elco's met een multimeter.
(© 2025 Jos Verstraten)

Meetfouten bij analoge multimeter metingen

Meetfouten door de parallax van de aflezing
Een analoge multimeter heeft één foutoorzaak extra, waarvan u geen last hebt bij digitale soortgenoten: de parallax van de aflezing. Tussen de wijzerplaat en de naald zit een afstand van een paar millimeter. Deze afstand kan afleesfouten veroorzaken. Dit verschijnsel noemt met de '*parallax-fout*'.
Parallax is het verschijnsel dat de schijnbare positie van een voorwerp ten opzichte van de achtergrond varieert als het voorwerp vanuit verschillende posities bekeken wordt. Als u de positie van de naald niet uitleest terwijl u loodrecht naar de wijzerplaat kijkt kunt u een verkeerde waarde aflezen. Dit wordt toegelicht aan de hand van de onderstaande figuur. Dit stelt een bovenaanzicht voor van de schaalverdeling en de naald van een analoog meetinstrument. De naald staat, vanuit het bovenaanzicht bekeken, precies boven de 5,00 schaalwaarde op de schaal. Als u echter het instrument vanuit de afleeshoek 1 afleest lijkt het alsof de naald boven de schaalwaarde 5,15 staat. Leest u af vanuit afleeshoek 2, dan staat de naald boven de schaalwaarde 4,95. Alleen de loodrechte afleeshoek 3 geeft de exacte waarde, de naald staat dan precies boven de schaalwaarde 5,00.



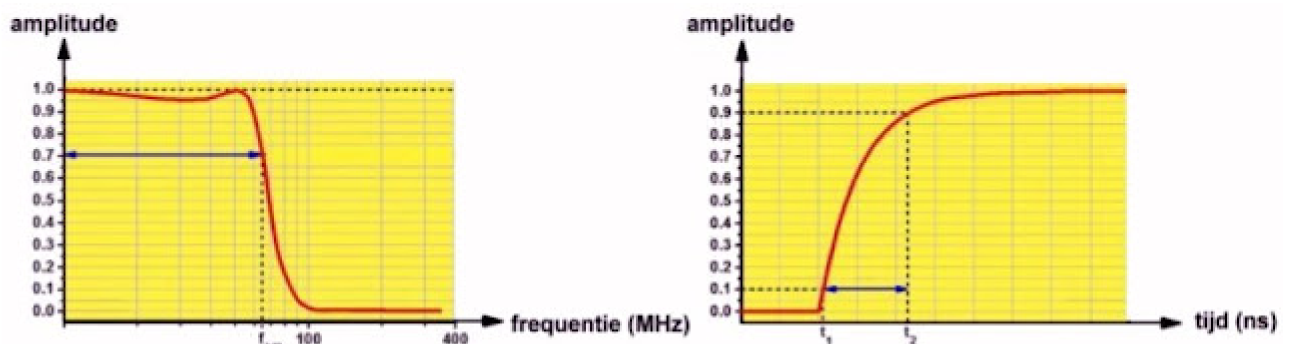
Het ontstaan van de parallax-fout bij wijzerinstrumenten.
(© 2025 Jos Verstraten)

Een vaak gebruikte methode om deze parallax-fout te voorkomen is de zogenaamde spiegel uitlezing. Op de wijzerplaat wordt, vlak onder of boven de schaalverdeling, een gleuf van ongeveer 5 mm breed aangebracht, met daarachter een spiegelend oppervlak. Door loodrecht op de wijzerplaat te kijken vallen spiegelbeeld van de wijzer en de wijzer samen en is de aflezing correct. Vrijwel alle draaispoelmeters en dus ook analoge multimeters zijn voorzien van zo'n schaal met spiegelgleuf.

Meetfouten bij oscilloscoop metingen

Meetfouten door de beperkte bandbreedte
De bandbreedte van een oscilloscoop wordt gedefinieerd als de frequentie waarbij het signaal op het scherm met 3 decibel (dB) is verzwakt ten opzichte van de werkelijke signaalamplitude. Dat lijkt niet veel, maar als u die dB-waarde omrekent naar een spanning betekent dit dat bij deze frequentie de gemeten signaalamplitude nog maar 70,7 % is van de werkelijke waarde. Als u de trotse eigenaar bent van een oscilloscoop met een bandbreedte

van 100 MHz en u meet een sinusvormig signaal met deze frequentie en met een amplitude van 5,0 V, dan zal dat signaal op het scherm nog maar 3,53 V groot zijn.
Bovendien gaat, na het -3 dB punt, de weergave heel snel naar beneden, zie de onderstaande figuur links. Voor niet-sinusvormige signalen, zoals pulsen of digitale signalen, is de bandbreedte ook van invloed op hoe nauwkeurig de flanken worden weergegeven.
Daarom hanteert men vaak de vuistregel:
Bandbreedteoscilloscoop ≥ 5 × hoogste frequentiecomponent in het signaal



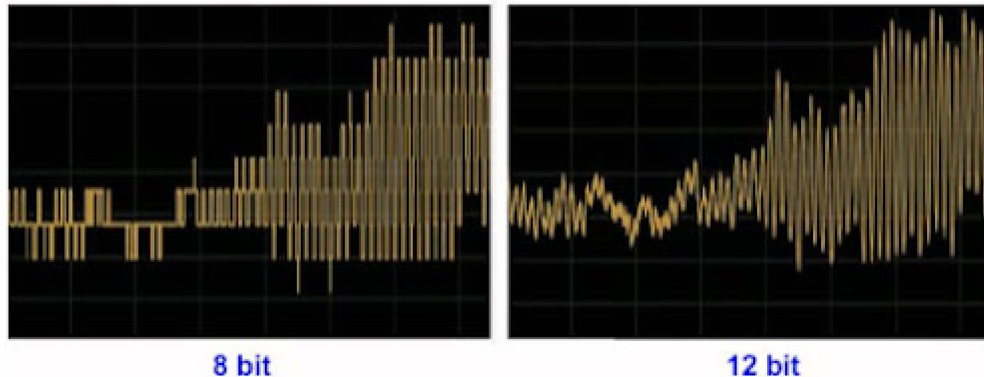
Definitie van de bandbreedte van een oscilloscoop en de stijgtijd van een puls.
(© 2025 Jos Verstraten)

De gevolgen van een te lage bandbreedte zijn:

- De signaal-amplitude wordt onderschat.
- Tijdmetingen zijn minder nauwkeurig:
  De stijg- en daaltijden van signalen lijken langer te duren dan in de werkelijkheid het geval is. Bij het meten van de stijgtijd van een signaal moet u immers ook rekening houden met de eigen stijgtijd van de oscilloscoop. Deze is afhankelijk van de bandbreedte en wel volgens de formule:
  stijgtijd (ns) = 350 / bandbreedte (MHz)
  Een 20 MHz oscilloscoop heeft, volgens deze vuistregel, een stijgtijd van 17,5 ns. Stel dat u met een dergelijk apparaat een puls meet die een stijgtijd heeft van 10 ns. Nu kunt stijgtijden niet gewoon bij elkaar optellen. De formule is:
  $\text{stijgtijd}_{\text{gemeten}} = \sqrt{[(\text{stijgtijd}_{\text{signaal}})^2 + (\text{stijgtijd}_{\text{oscilloscoop}})^2]}$
  De gemeten stijgtijd van de puls wordt dan:
  $\text{stijgtijd}_{\text{gemeten}} = \sqrt{[(10)^2 + (17{,}5)^2]}$
  $= \sqrt{[100 + 306{,}25]}$
  $= \sqrt{406{,}25}$
  $= 20{,}15$ ns
  De puls wordt op het scherm van uw oscilloscoop dus weergegeven met een stijgtijd die het dubbele is van de échte stijgtijd!
- Vervorming van signaalvorm:
  Complexe signalen (zoals pulsen of digitale signalen) verliezen hun scherpe randen en tonen een afgeronde, onnauwkeurige vorm.

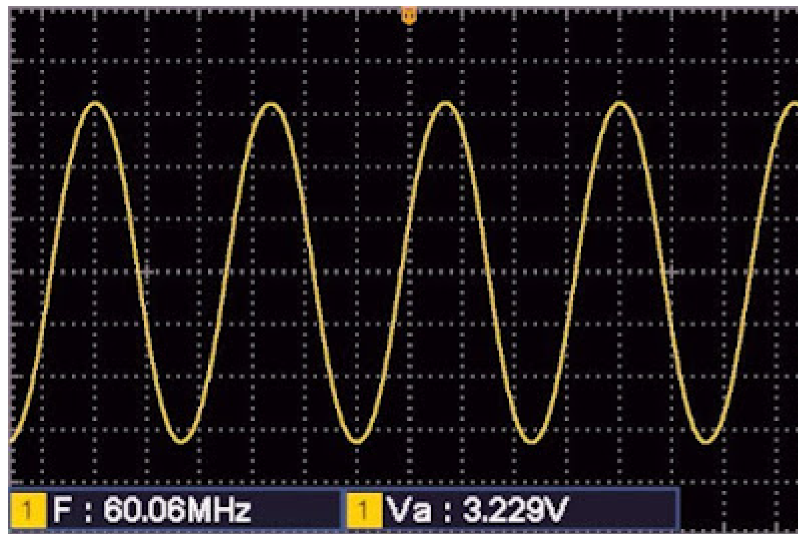
Meetfouten door de beperkte resolutie
De verticale resolutie van een oscilloscoop bepaalt hoe nauwkeurig de oscilloscoop de spanningsvariaties in een signaal kan weergegeven. Een digitale oscilloscoop is gekwantiseerd, dat betekent dat hij het signaal op de ingang alleen kan weergeven door er een zo goed mogelijke trapvormige benadering van de reconstrueren. Iedere trede van de trap komt overeen met een bepaald spanningsniveau. Een digitale oscilloscoop gebruikt een ADC die typisch 8, 10 of 12 bit breed is. Goedkope oscilloscopen werken allemaal met 8 bit. Bij een dergelijk apparaat kan het signaal worden weergegeven in 2^8 = 256 niveaus. Bij een apparaat met een resolutie van 12 bit wordt dat al 2^{12} = 4.096 niveaus. Als u een signaal met een amplitude van 10 V weergeeft op een oscilloscoop met acht bit resolutie betekent dit dat de 256 verschillende niveaus 39 mV uit elkaar liggen. Dat is de kleinste spanningsvariatie in

dit signaal die deze oscilloscoop kan waarnemen. Bij een 12 bit apparaat is deze waarde slechts 2,44 mV.
Hoe zich dat in de praktijk uit blijkt uit de onderstaande figuur. Hier wordt de weergave van een bepaald signaal op een 12 bit oscilloscoop vergeleken met deze op een 8 bit apparaat. Commentaar overbodig!



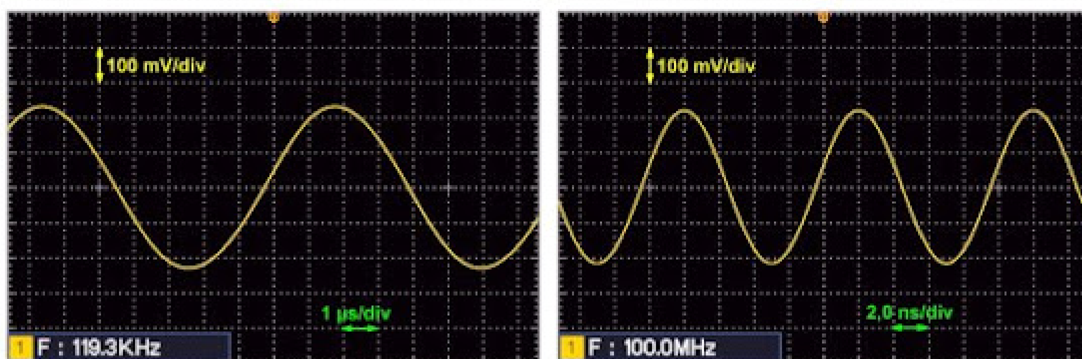
Weergave van een signaal op oscilloscopen met 8 bit en met 12 bit resolutie.
(© 2025 Jos Verstraten)

Meetfouten door de te lage ingangsimpedantie
Net zoals een multimeter heeft ook een oscilloscoop een ingangsweerstand en een ingangscapaciteit. Die twee componenten staan parallel geschakeld tussen de BNC-ingang en de massa. De weerstand is gestandaardiseerd op 1 MΩ. De capaciteit moet zo laag mogelijk zijn. Omdat u uw oscilloscoop vaak gebruikt bij het meten van signalen waarin veel hoogfrequente harmonischen aanwezig zijn, speelt deze een zeer belangrijke rol. Een waarde van rond 20 pF wordt vaak bij de specificaties vermeld. Dit lijkt verwaarloosbaar, maar dat is het absoluut niet. Een condensator heeft een wisselspanningsweerstand, een impedantie, die kleiner wordt naarmate de frequentie van het signaal over de condensator groter wordt.
Die ingangscapaciteit van 20 pF heeft bij een signaal met een frequentie van 10 MHz een impedantie van 795,8 Ω. Bij 100 MHz neemt die impedantie af tot slechts 79,58 Ω.
Als u dus een sinusspanning met een frequentie van 100 MHz aansluit op een oscilloscoop, dan ziet dat signaal niet de ingangsweerstand van 1 MΩ, maar de impedantie van slechts 79,58 Ω van de capaciteit. Die vormt dus een heel zware belasting voor dit signaal.
Het onderstaand oscillogram geeft een mooie voorbeeld van dit soort meetfouten. Wij hebben de uitgangsspanning van een functiegenerator ingesteld op sinus, 60 MHz en 5 $V_{top\text{-}tot\text{-}top}$. Wij willen dit signaal controleren met onze oscilloscoop. Dan blijkt dat de oscilloscoop beweert dat de generator slechts 3,229 V levert in plaats van de ingestelde 5,000 V. Fout is de software van de functiegenerator? Nee, een meetfout door de zeer lage ingangsimpedantie van onze oscilloscoop bij een dergelijke hoge signaalfrequentie. De functiegenerator heeft immers een uitgangsweerstand van 50 Ω en de oscilloscoop een ingangsimpedantie van 132,6 Ω. De ingestelde top-tot-top waarde van de sinus verdeelt zich evenredig over de uitgangsweerstand van de generator en de ingangsimpedantie van de oscilloscoop.



Daling van de uitgangsspanning van een functiegenerator door de lage ingangsimpedantie van een oscilloscoop.
(© 2025 Jos Verstraten)

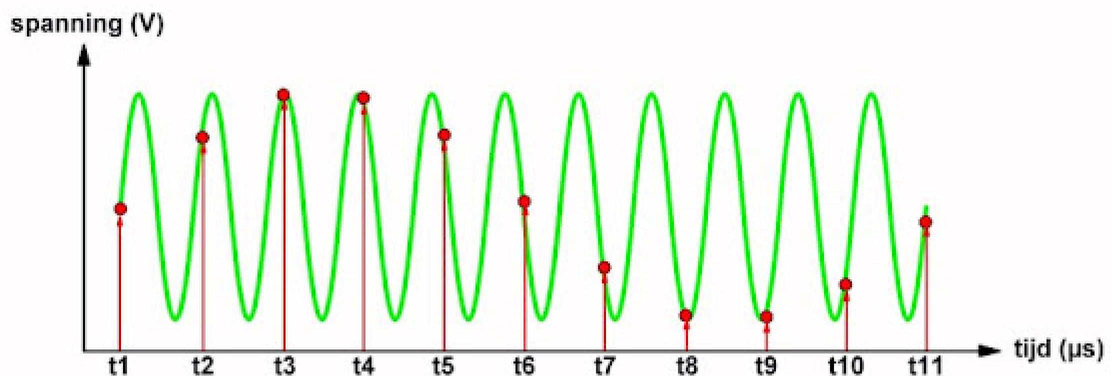
Meetfouten door te lage sampling-rate (aliasing-fouten)
Een digitale oscilloscoop is een sampling-instrument. Het neemt op gelijke tijdintervallen monsters van het ingangssignaal en zet de grootte van die monsters van links naar rechts als puntjes op het scherm. Die puntjes worden dan via een bepaald wiskundig interpolatie-algoritme met elkaar verbonden tot één vloeiend beeld. De sampling-rate bepaalt hoeveel van die monsters er per seconde worden genomen en dat is afhankelijk van de instelling van de tijdbasis van de oscilloscoop.
Aliasing-fouten treden op als u een snel signaal met een te trage sampling-rate meet. Een heel mooi voorbeeld is voorgesteld in de onderstaande afbeelding. Wij sluiten een 100 MHz sinusvormig signaal aan op onze oscilloscoop en stellen de versterking en de tijdbasis zo in dat een mooi beeld van een paar perioden op het scherm verschijnt. Het blijkt echter dat zo'n beeld zowel ontstaat bij een tijdbasis instelling van 1,0 µs/div (links) als bij 2,0 ns/div (rechts). Het linker signaal wordt gesampled met 50 MSa/s, het rechter met 500 MSa/s. Wat is de correcte voorstelling van het te meten signaal? Hier ziet u dat onmiddellijk omdat wij de oscilloscoop de frequentie van het signaal laten meten. Omdat wij weten dat die gelijk is aan 100 MHz is het duidelijk dat het rechter signaal goed is en het linker signaal fout is. Maar zo duidelijk te traceren zijn aliasing-fouten niet altijd!

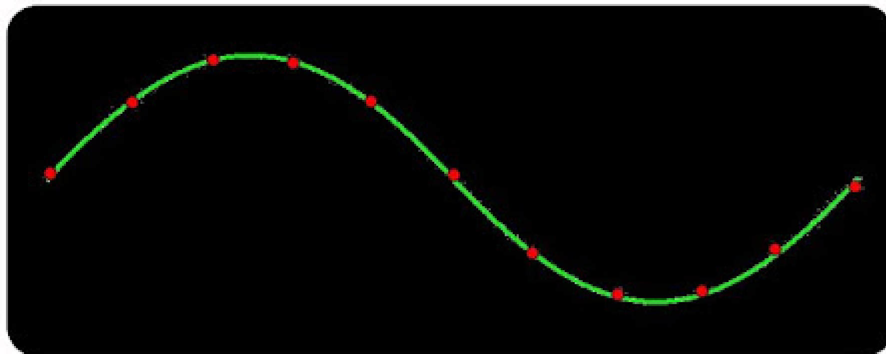


Foutieve voorstelling van een signaal (links) door te lage sampling-rate.
(© 2025 Jos Verstraten)

Hoe ontstaan dergelijke aliasing-fouten? Dat kunnen wij het duidelijkst grafisch aantonen. In de onderstaande figuur ziet u in de bovenste grafiek het ingangssignaal (groen) van een oscilloscoop. Dit wordt met een bepaalde frequentie gesampled, de rode bolletjes zijn de momenten waarop de samples worden genomen. De rode pijltjes geven de waarde van de samples weer. Die sample-punten worden door de software in de oscilloscoop met dezelfde onderlinge verhoudingen op het scherm gezet. Het interpolatie-algoritme verbindt deze punten met gebogen lijntjes, zodat een zo vloeiend mogelijke vorm ontstaat. En zoals u ziet:

de elf perioden die in het beschouwde tijdinterval t_1 tot en met t_{11} aan de ingang van de oscilloscoop worden aangeboden worden op het scherm weergegeven door slechts één periode van een veel laagfrequenter signaal.

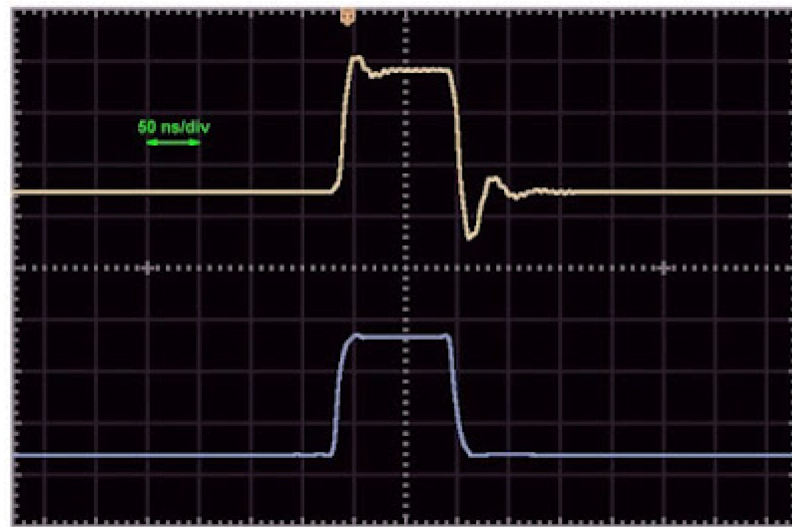




Grafische verklaring van het ontstaan van aliasing-fouten.
(© 2025 Jos Verstraten)

Hoe zijn dergelijke aliasing-fouten te vermijden? Door de sample-frequentie zo hoog mogelijk te kiezen. Volgens het '*nyquist-criterium*' moet de sampling-frequentie minstens gelijk zijn aan twee maal de hoogste frequentie in het signaal. Begin dus bij het meten van een onbekend signaal altijd met de tijdbasis op de snelste stand te zetten en verlaag deze tot u een goed beeld hebt.

Meetfouten door slechte impedantie-aanpassing (kabelreflecties)
Wij hebben een experimentje uitgevoerd. Wij hebben de uitgang van onze pulsgenerator PM5704 van Philips ingesteld op een pulsbreedte van 100 ns en een herhalingstijd van 1 ms. Wij hebben deze generator door middel van een coaxiale kabel met aan weerszijden BNC-connectors rechtstreeks aangesloten op de ingang van onze oscilloscoop. Wat wij op het scherm te zien krijgen is weergegeven in het gele oscillogram op de onderstaande afbeelding. Een puls die nergens op lijkt en het schijnbare bewijs levert dat onze pulsgenerator defect is. Vervolgens hebben wij dat experimentje herhaald maar nu hebben wij een klein doosje, '*terminator*' genaamd, aan onze meetopstelling toegevoegd. Wat op het scherm verschijnt ziet u in het blauwe oscillogram. Welk van beide metingen toont de echte uitgangsspanning van de pulsgenerator? Blijkbaar gaat er iets mis als u smalle, snelle pulsen via een coaxiale kabel rechtstreeks verstuurt van een signaalbron naar een oscilloscoop.



Een 100 ns brede puls zonder en met 'terminator'.
(© 2025 Jos Verstraten)

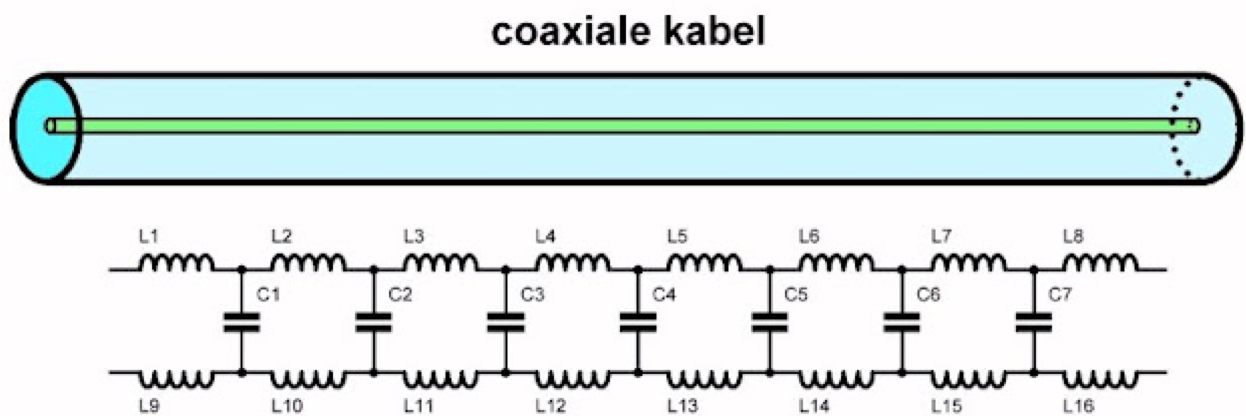
Over impedanties van signaalbronnen, kabels en oscilloscopen
Een signaalbron heeft een bepaalde inwendige weerstand of impedantie. Uw oscilloscoop heeft een bepaalde ingangsimpedantie. De coaxiale kabel met twee BNC-connectoren die u gebruikt om de signaalbron met de oscilloscoop te verbinden heeft, hoe gek het ook mag klinken, ook een bepaalde impedantie. Bij metingen aan hoogfrequente signalen moet u er voor zorgen dat die drie impedanties aan elkaar gelijk zijn. Doet u dat niet, dan kunnen zware meetfouten ontstaan waarvan wij u er eentje hebben laten zien. Die meetfouten ontstaan door zogenaamde '*reflecties*' van het signaal. Een deel van het uitgangssignaal van de signaalbron kan, als het aankomt bij de oscilloscoop, worden teruggekaatst in de kabel. Dit veroorzaakt reflecties die zichtbaar kunnen zijn als rimpelingen of echo's in het signaal.
In de elektronische meettechniek gebruikt men een impedantie van 50 Ω als standaard. Vrijwel alle signaalgeneratoren van het betere soort hebben een inwendige weerstand of impedantie van 50 Ω. Coaxkabels met BNC-connectoren aan de uiteinden kunt u kopen met een specifieke impedantie van 50 Ω. Blijft over de oscilloscoop die, zoals reeds beschreven, een ingangsimpedantie heeft die sterk afhankelijk is van de frequentie van het te meten signaal. Daar heeft men wat op gevonden: zogenaamde '*terminators*' die u op de BNC-ingang van de oscilloscoop zet en waarop u aan de andere kant de meetkabel aansluit. In de terminator zit een inductie- en capaciteits-arm weerstandje van 50 Ω dat parallel staat aan de ingang van de oscilloscoop. Op die manier krijgt ook dit meetinstrument een impedantie van ongeveer 50 Ω en hebt u aan de eis van impedantie-gelijkheid voldaan. In de onderstaande foto ziet u drie van die terminators in diverse prijsklassen. De HZ22 kost € 62,92, de Chinese P57 € 9,99.



Drie terminators van 50 Ω. (© 2025 Jos Verstraten)

Hoe komt een coaxiale kabel aan zijn impedantie?
Zo'n kabel bestaat uit twee geleiders die op een bepaalde afstand van elkaar zijn opgesteld. Tussen deze geleiders bevindt zich een isolerende stof, diëlektricum genoemd. Dat is uiteraard exact de definitie van een condensator. U kunt een coaxiale kabel dus beschouwen als een soort van langgerekte condensator. Omdat hiermee in de praktijk niet te rekenen valt verdeelt men de kabel in een groot aantal kleine kabeltjes die ieder een identieke kleine capaciteit hebben. Die kleine stukjes kabel staan uiteraard allemaal achter elkaar. Al die kleine condensatoren staan dus parallel geschakeld. De '*specifieke capaciteit*' C_i is de

capaciteit van één meter van de kabel. Deze waarde kan vrij groot zijn, een waarde van 65 pF/m is geen uitzondering.
Als een wisselstroom *i* op een bepaald moment via de binnenste ader wordt getransporteerd naar een belasting en via de buitenader weer terug stroomt naar de bron heeft dit een magnetische flux φ tussen beide geleiders tot gevolg. Beide geleiders zijn dus met elkaar gekoppeld door deze flux. Als er een wisselstroom door de kabel vloeit dan zal er een elektromotorische kracht van zelfinductie worden gegenereerd. Een coaxiale kabel heeft dus niet alleen een bepaalde capaciteit, maar ook een bepaalde zelfinductie. Ook nu kunt u zich dit verschijnsel voorstellen als de serieschakeling van een heleboel kleine zelfinducties in kleine kabeldeeltjes die achter elkaar staan. De '*specifieke zelfinductie*' L_i is dan de zelfinductie per meter kabel, uitgedrukt in H/m.
Als u deze beide eigenschappen van de kabel bij elkaar voegt kunt u een coaxiale kabel voorstellen door het onderstaand equivalent schema. Natuurlijk heeft het koper van de beide aders ook nog een ohmse weerstand. Deze laten wij hier buiten beschouwing omdat deze bij de verklaring van het gedrag van de kabel voor hoogfrequent wisselspanningen nauwelijks een rol speelt.



Het equivalent schema van een coaxiale kabel. (© 2025 Jos Verstraten)

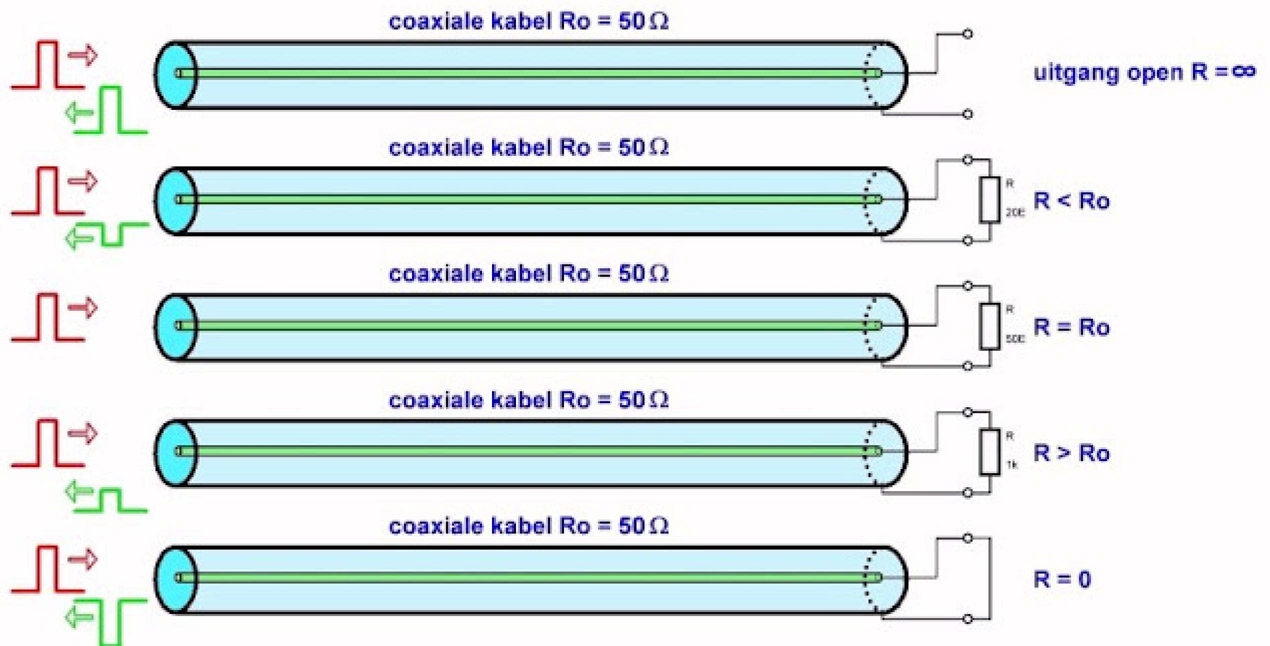
Stel dat u op een heel lange kabel aan één uiteinde een wisselspanning aanlegt. Deze spanning zal alle equivalente condensatoren die tussen de twee geleiders aanwezig zijn, een na een opladen. Dat opladen veroorzaakt een stroom die door alle equivalente zelfinducties van de kabel loopt. Maar... als u aan een systeem een spanning legt en het gevolg is dat er stroom door het systeem gaat lopen, dan kunt u besluiten dat er sprake is van een bepaalde weerstand of impedantie. Dat volgt immers rechtstreeks uit de wet van ohm die het verband legt tussen spanning en stroom.
Men kan wiskundig bewijzen dat, voor een oneindig lange kabel, de verhouding tussen de aangelegde wisselspanning *u* en de als gevolg daarvan lopende wisselstroom *i* constant is. Deze verhouding noemt men de '*karakteristieke impedantie*' Z_o van de kabel. Men kan bovendien, alweer zuiver wiskundig, aantonen dat deze Z_o gelijk is aan de vierkantswortel uit de verhouding tussen de specifieke zelfinductie L_i en de specifieke capaciteit C_i. Onder formulevorm:
$Z_o = \sqrt{[L_i / C_i]}$
De karakteristieke impedantie van een coaxiale kabel is een van de voornaamste specificaties van een dergelijke kabel. Specifieke impedantiewaarden van bekende coaxiale kabels zijn 50 Ω, 75 Ω, 135 Ω en 300 Ω. De coaxkabels die in de elektronische meettechniek worden toegepast hebben een karakteristieke impedantie van 50 Ω.

Het verschijnsel '*kabelreflectie*'
Ons experimentje met en zonder terminator toont de gevolgen van wat genoemd wordt '*kabelreflectie*'. Als u een signaal in een coaxiale kabel stuurt zal dit met een bepaalde snelheid naar het andere einde van de kabel reizen. Als het daar aankomt kan het gebeuren dat een deel van dit signaal wordt teruggekaatst naar de ingang van de kabel. Dat verschijnsel ontstaat als u de kabel niet afsluit met een weerstand die exact gelijk is aan de karakteristieke weerstand van de kabel. Alleen als u dat wél doet zal het signaal door de

afsluitweerstand volledig worden geabsorbeerd en wordt en niets van het signaal gereflecteerd. Bovendien kunnen aan de uitgang van een niet goed afgesloten kabel allerlei ongewenste resonanties ontstaan.
Het gereflecteerde signaal en de resonanties zullen zich mengen met het signaal dat werd uitgezonden door de pulsgenerator en er verschijnen allerlei volledig onvoorspelbare maar in ieder geval foutieve beelden op het scherm van uw oscilloscoop. Op zo'n manier valt te verklaren waarom bij ons experiment in het bovenste oscillogram zo'n afschuwelijk lelijk signaal op het scherm van de oscilloscoop verschijnt. De uitgang van de pulsgenerator heeft een weerstand van 50 Ω. Deze is aangesloten op een kabel met een karakteristieke weerstand van 50 Ω, niets aan de hand. De kabel wordt echter aangesloten op de ingang van de oscilloscoop die een ingangsweerstand heeft van 1 MΩ. Dat is niet zoals het hoort en de kabel reageert hierop door een deel van het signaal terug te sturen en er nog wat resonanties aan toe te voegen. De oscilloscoop registreert nu niet het originele signaal van de pulsgenerator, maar de menging van dit signaal met het gereflecteerde signaal.
Er bestaan vijf mogelijkheden waarop u een kabel kunt afsluiten:

- De uitgang kortsluiten.
- De uitgang afsluiten met een kleinere weerstand dan Z_o.
- De uitgang afsluiten met een weerstand gelijk aan Z_o.
- De uitgang afsluiten met een grotere weerstand dan Z_o.
- De uitgang open laten.

In de onderstaande figuur hebben wij getekend wat voor soort reflecties u kunt verwachten.

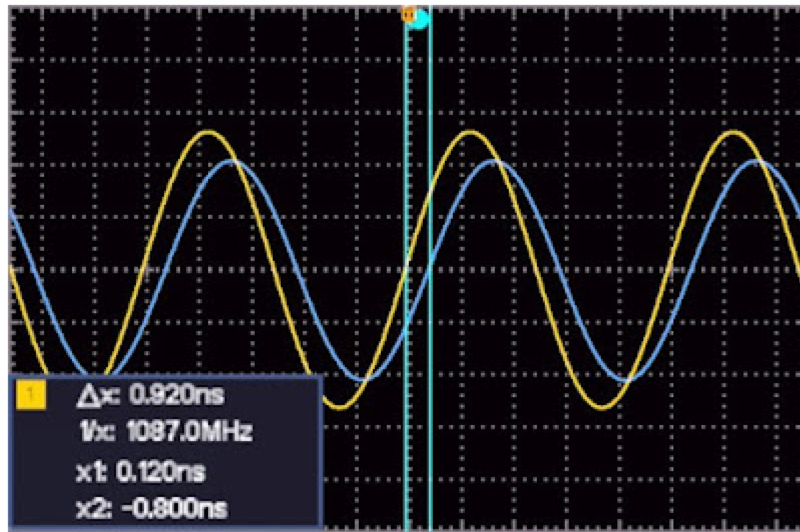


Verschillende manieren om een coaxiale kabel af te sluiten en de optredende reflecties.
(© 2025 Jos Verstraten)

Meetfouten door de looptijden van signalen

Uit het verhaal over de karakteristieke impedantie van een kabel volgt dat een signaal zich niet met een oneindig hoge snelheid door een kabel verplaatst. De snelheid waarmee een signaal zich voortplant door een 50 ohm coaxkabel, zoals RG-58, hangt af van de '*vertragingfactor*' (velocity factor) van de kabel. Deze factor geeft aan met het hoeveelste deel van de lichtsnelheid het signaal zich door de kabel verplaatst. De lichtsnelheid in vacuüm bedraagt ongeveer 300.000 km/s. De velocity factor van een coaxkabel varieert meestal tussen 0,66 en 0,85, afhankelijk van het type isolatiemateriaal in de kabel. Dat komt dus overeen met een snelheid van 198.000 km/s tot 255.000 km/s. Dat lijkt (en is natuurlijk ook) heel snel. Maar in de elektronica wereld van de sneller dan 100 MHz signalen kan die niet oneindige snelheid toch voor fouten zorgen. Het gaat dan over looptijdverschillen van signalen door kabels van verschillende lengte of soort.
Die veroorzaken schijnbare faseverschillen tussen signalen die er in realiteit niet zijn.

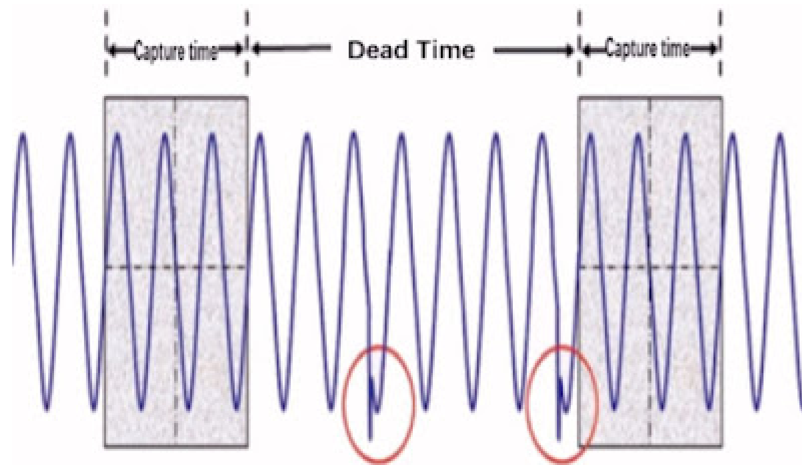
In de onderstaande afbeelding ziet u het verschil in signaalvertraging tussen twee kabels aangesloten op dezelfde signaalbron die een sinus levert met een frequentie van 100 MHz. Het gele signaal is dat van een RG58 kabel met een lengte van 100 cm. Het blauwe signaal is aangesloten op het tweede kanaal van de oscilloscoop via drie identieke kabels die met BNC-koppelstukken aan elkaar hangen. Het verschil in looptijd tussen deze twee kabels bedraagt 0,92 ns.



Looptijdverschillen die ontstaan door kabels van verschillende lengte.
(© 2025 Jos Verstraten)

Meetfouten door te lage waveform capture rate
De '*golfvorm registratie snelheid*' of in het Engels de '*waveform capture rate*' is een niet zo bekende, maar heel belangrijke eigenschap van digitale oscilloscopen. U begrijpt inmiddels het begrip '*sampling-rate*' bij digitale oscilloscopen. Deze grootheid geeft aan hoe vaak het apparaat het ingangssignaal bemonstert binnen een meetcyclus. Deze bemonsterde signalen moeten door de software en de elektronica worden verwerkt tot een beeld op het scherm. Dat duurt een bepaalde tijd die veel langer is dan de sampling-tijd en in deze '*dode tijd*' is een digitale oscilloscoop zo blind als een mol. In dat tijdsinterval kunnen er slechts af en toe voorkomende onregelmatigheden op de ingangsspanning verschijnen die door de oscilloscoop worden gemist. Een analoge oscilloscoop heeft geen last van dit verschijnsel. Het vastleggen van deze willekeurige en onregelmatige gebeurtenissen op het signaal wordt als gevolg van de dode tijd een kwestie van statistische waarschijnlijkheid. Soms wordt zo'n spike wel waargenomen, soms echter niet. Dit gegeven wordt uitgedrukt door de grootheid '*waveform update rate*' en uitgedrukt in wfms/s (**w**ave**f**or**ms** per second).
Keysight illustreert dit met een voorbeeld: een fout die gemiddeld 1 × per 50.000 cycli voorkomt, wordt bij 100.000 wfms/s gemiddeld twee keer per seconde zichtbaar, terwijl bij slechts 800 wfms/s daarvoor gemiddeld zo’n minuut moet worden gewacht.
Bij de meeste goedkope oscilloscopen wordt deze grootheid niet eens vermeld. Wij moeten dus te rade gaan bij de duurdere modellen:

- UNI-T UTD2102CEX: 2.000 wfms/s, prijs € 235,00
- Owon XDS3062A: 75.000 wfms/s, prijs € 465,00
- UNI-T MSO2202-S: 1.000.000 wfms/s, prijs € 1.069,81

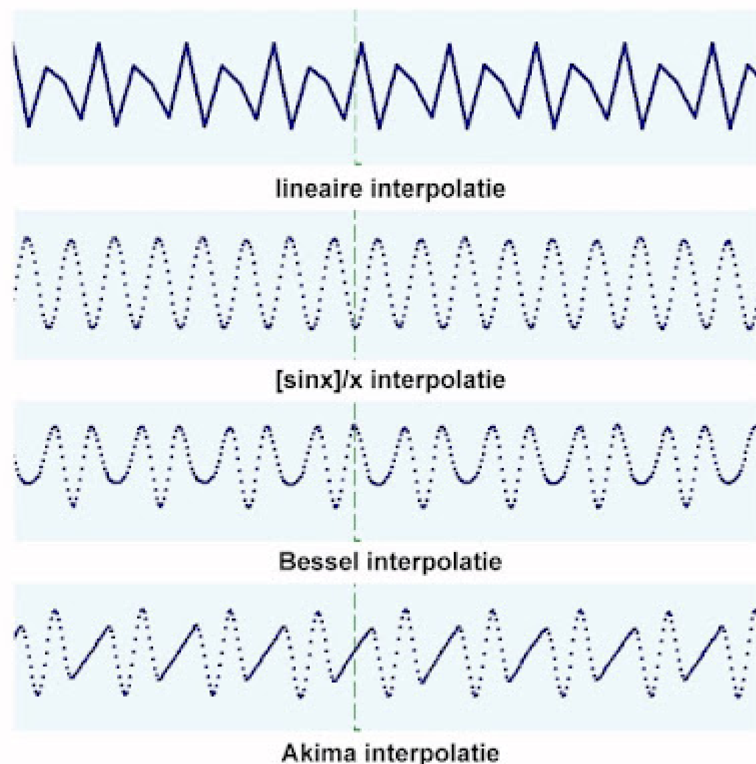


De 'waveform capture rate' grafisch toegelicht.
(© events.uni-trend.com)

Meetfouten door de beeldinterpolatie
U weet inmiddels dat het beeld dat op het scherm van uw digitale oscilloscoop verschijnt is samengesteld uit een heleboel puntjes, die ieder één sample weergeven van het ingangssignaal. Die puntjes worden verbonden met lijntjes zodat een vloeiend beeld ontstaat. Dat noemt men de '*beeldinterpolatie*'. Dit proces ligt in de handen van wiskundige algoritmes, uitgevoerd door de processor in uw oscilloscoop. Er zijn diverse algoritmes ontwikkeld, zoals:

- lineaire interpolatie
- (sin x)/x interpolatie
- Bessel interpolatie
- Akima interpolatie

Bij het weergeven van laagfrequente signalen werken die algoritmes vrijwel identiek. Verschillen treden maar eerst op als u de grenzen van uw oscilloscoop opzoekt. In de onderstaande afbeelding hebben wij samengevat hoe deze vier algoritmes een sinussignaal met een frequentie van 100 MHz weergeven bij een samplingrate van 400 MSa/s.



Meetfouten als gevolg van het toegepaste beeldinterpolatie algoritme.
(© www.tmatlantic.com)

Meetfouten bij gebruik van 1/10-meetprobes

Waarom een 1/10-meetprobe gebruiken?
Misschien hebt u zich wel eens afgevraagd waarom multimeters altijd met 4 mm banaanstekkerbussen worden geleverd en oscilloscopen altijd met BNC-connectoren en met meetprobes. Het antwoord is simpel. Met uw multimeter meet u gelijkspanningen en -stromen, weerstanden, condensatoren en zeer laagfrequente wisselspanningssignalen. Dan kunt u gewone meetkabels met banaanstekkers toepassen. Met uw oscilloscoop meet u vaak complexe signalen met frequenties in het MHz-gebied. Dan moet u absoluut coaxkabels toepassen en nog beter meetprobes met een ingebouwde 1/10 verzwakker. Daarmee kunt u niet alleen hogere spanningen meten, maar dank zij de hogere impedantie van zo'n probe wordt het te meten signaal minder resistief belast. Ook de capacitieve belasting van het meetpunt daalt, waardoor de signaalintegriteit meer behouden blijft. Een oscilloscoop zonder een dergelijke probe levert een capacitieve belasting tussen 10 pF en 20 pF. Mét een heel goede 1/10-probe daalt deze belasting tot maximaal 2 pF.
Om het voordeel van een 1/10-probe te illustreren hebben wij de vrijwel ideale 1 MHz puls van onze '*fast edge pulse generator*', op de markt gebracht door het Chinese bedrijf Changsha Findra Trading Co, als signaalgever gebruikt en de uitgang ervan op de volgende vier manieren verbonden met onze oscilloscoop:

- rechtstreeks in de BNC-ingang zonder kabels
- met twee meetsnoeren met banaanstekkers
- met een oscilloscoopprobe op de stand 1/1
- met dezelfde probe op de stand 1/10

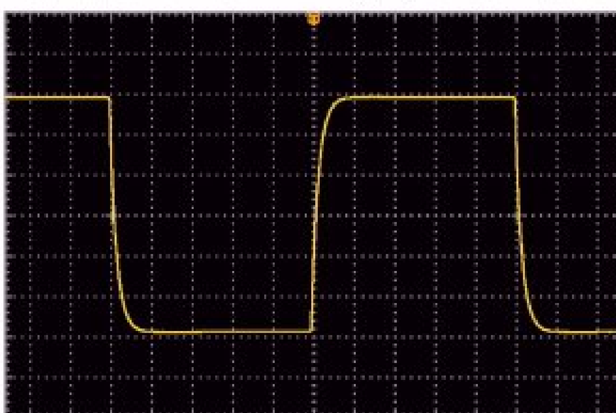
De resultaten zijn samengevat in de onderstaande illustratie. U ziet dat de verbinding met de in stand 1/10 geschakelde meetprobe de beste benadering oplevert van de ideale puls. Uiteraard hebben wij de versterking van de oscilloscoop in de 1/10 meting opgevoerd om dezelfde schaal op het scherm te krijgen. Het introduceren van zo'n meetprobe brengt echter ook het risico op typische meetfouten met zich mee!



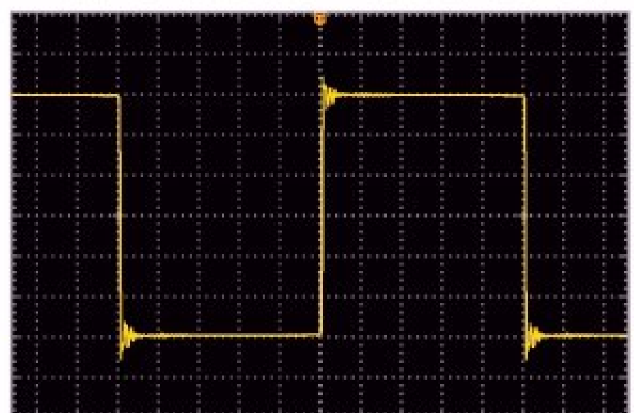
rechtstreeks in de BNC-ingang zonder kabels



met twee meetsnoeren met banaanstekkers



met een oscilloscoopprobe op de stand 1/1

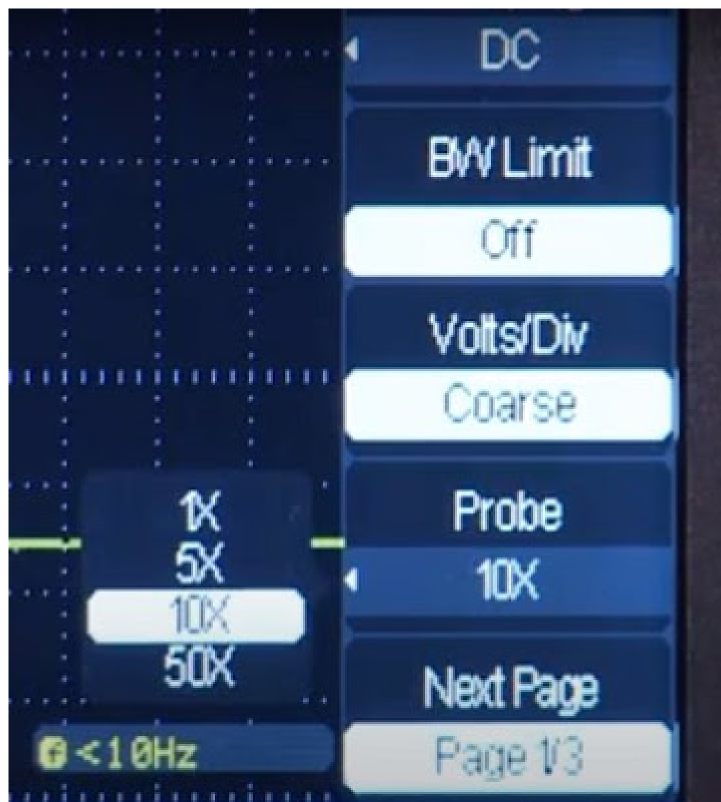


met dezelfde probe op de stand 1/10

Vier manieren om een pulsgenerator te verbinden met uw scope. (© 2025 Jos Verstraten)

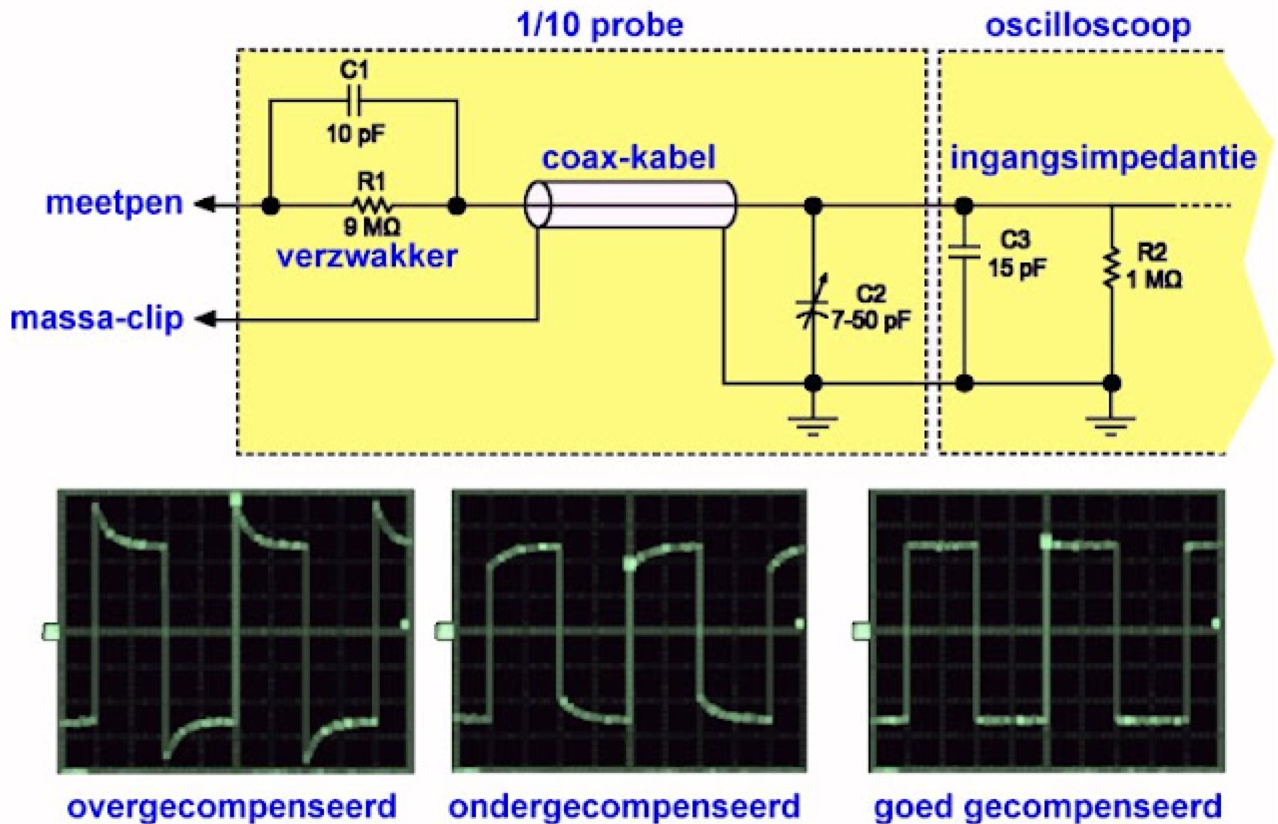
Meetfouten door verkeerde instelling op de oscilloscoop

Iedere digitale oscilloscoop biedt de mogelijkheid om de verticale gevoeligheid en de amplitude van de gemeten spanning numeriek op het scherm weer te geven. Als u uw meetprobe in de stand 1/10 zet mag u niet vergeten dit ook aan de oscilloscoop te melden, zodat het apparaat deze signaalverzwakking in de berekeningen kan opnemen. Die optie treft u aan in het menu van de verticale instellingen.



Instellen van de probe-verzwakking in het verticale menu.
(© 2025 Jos Verstraten)

Meetfouten door verkeerde compensatie van de probe
In iedere 1/10-probe is een instelschroefje aanwezig waarmee u de in de probe ingebouwde verzwakker zo frequentie-onafhankelijk als mogelijk is kunt afregelen. Dat schroefje zit op een trimmercondensator C2 die, zie het onderstaand schema, aanwezig is in de BNC-connector die u in de scope plugt. Het is de bedoeling dat het condensator netwerk C1-C2-C3 precies dezelfde verzwakking geeft voor wisselspanningen als de weerstandsdeler R1-R2. Dat doet u door de probe aan te sluiten op de blokgolf-uitgang die op iedere oscilloscoop aanwezig is en het schroefje met een *niet metalen schroevendraaier* te verdraaien tot de blokgolf echt rechthoekig op het scherm verschijnt. Men zegt dan dat de probe volledig is gecompenseerd. In de twee andere oscillogrammen onder het schema ziet u wat er op het scherm verschijnt als de probe niet goed is gecompenseerd.

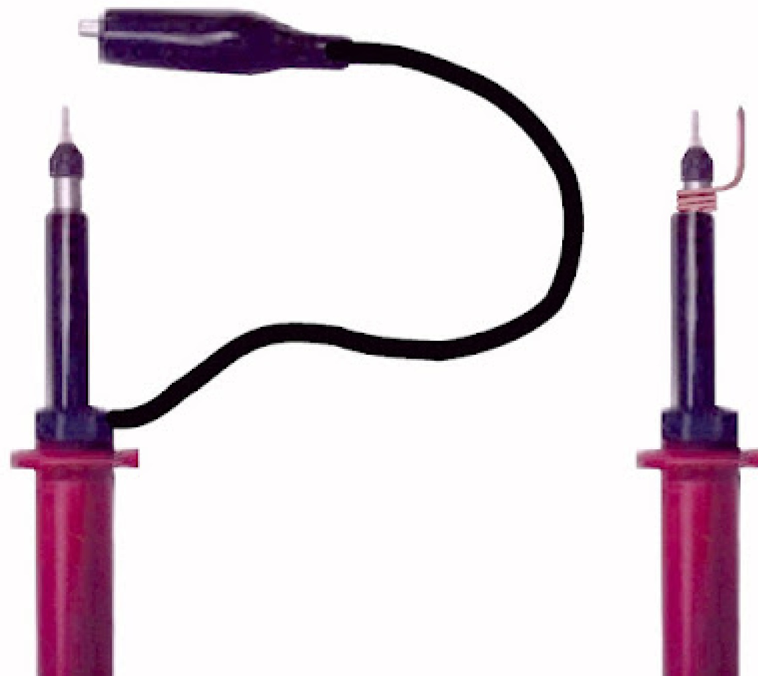


Afregelen van de probe in de 1/10-stand. (© 2025 Jos Verstraten)

Meetfouten door frequentiebereik van de probe
Het frequentiebereik van de 1/10-probe moet minstens gelijk zijn aan de bandbreedte van uw oscilloscoop. Het prijsverschil tussen een 50 MHz probe en een 200 MHz probe is zo gering dat het misplaatste zuinigheid zou zijn om niet de 200 MHz bandbreedte te kiezen.

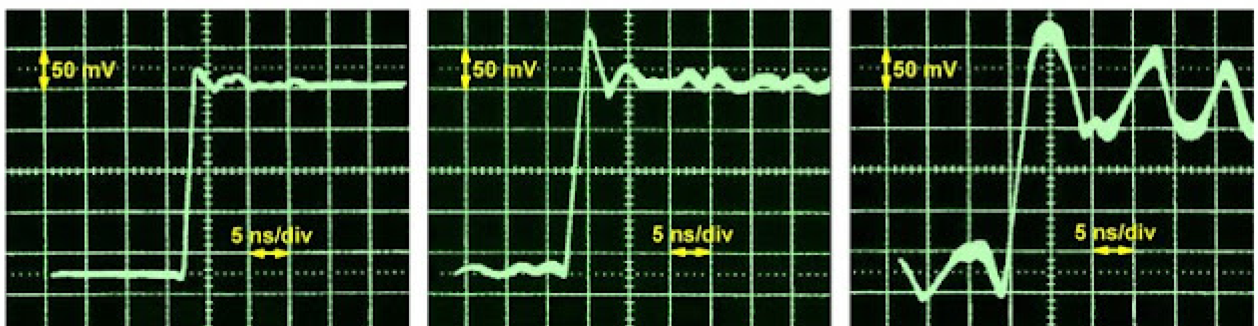
Meetfouten door capacitieve belasting door de probe
Hoewel de capacitieve belasting van een oscilloscoop plus 1/10-probe kleiner is dan deze van de oscilloscoop zonder probe kan een meting in gevoelige hoogohmige schakelingen toch nog voor signaalvervormingen zorgen.

Meetfouten door onjuiste massaverbinding van de probe
U moet de meetprobe van uw oscilloscoop verbinden met de massa van de schakeling waarin u meet. Vrijwel alle 1/10-probes die u kunt kopen hebben daarvoor een zogenaamde '*sprunghook groundlead*'. Dat is een kort draadje, tien tot twintig centimeter lang, dat aan één kant via een verend haakje of pennetje contact maakt met de afscherming van de probe. Aan de andere kant zit een krokodilbek-klem waarmee u de verbinding met de massa kunt maken. In de onderstaande foto ziet u een dergelijke massa-aansluiting op de linker foto.



Twee soorten massa-verbindingen van een oscilloscoop-probe.
(© 2025 Jos Verstraten)

Of u het gelooft of niet, een dergelijk klein draadje kan signaalvervormingen veroorzaken in het beeld dat u op het scherm van uw oscilloscoop ziet. Dat draadje heeft namelijk een zeer kleine zelfinductie en die inductie vormt, samen met de capaciteit van de probe, een LC-kring die een resonantiefrequentie heeft van ongeveer 150 tot 500 MHz. Die kring gaat even oscilleren als u een zeer snelle impuls meet. In de onderstaande afbeelding ziet u drie oscillogrammen van hetzelfde signaal met drie verschillende lengtes van dit draadje. De probe is een (dure) P6137 van Tektronix met een bandbreedte van 400 MHz. Hoe korter het draadje, hoe minder last u hebt van die oscillaties.



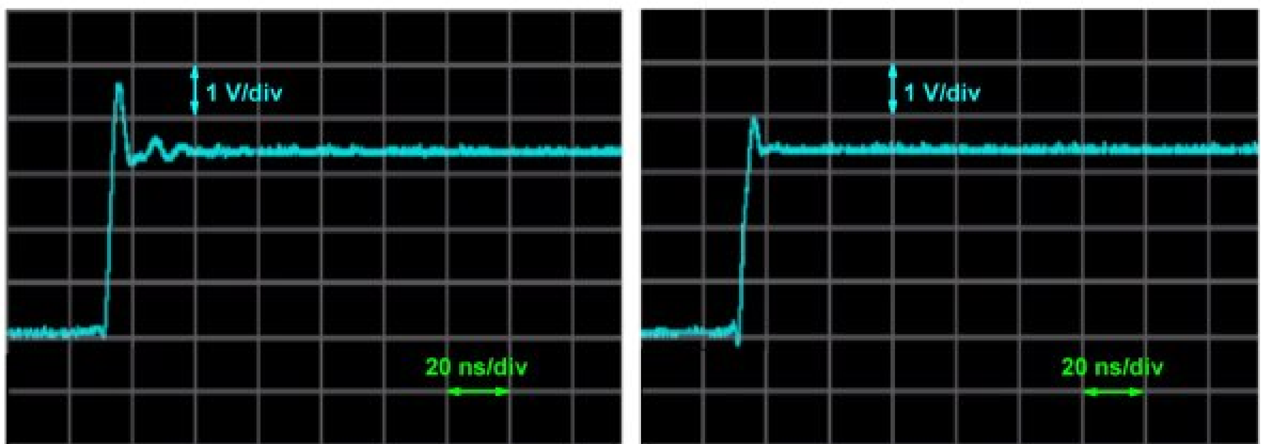
De invloed van de lengte van de sprunghook groundlead
op de weergave van een ideale puls.
(© 2018 Beam Verlag)

U u goed kijkt, dan ziet u dat de meeste 1/10-probes een klein metalen cilindertje hebben, vlak onder de meetpunt. Dat metalen vlakje is verbonden met de massa van de kabel. Dat cilindertje zit er niet voor niets, u kunt daar een '*bayonet style groundlead*' op aansluiten. Dat is voorgesteld in de rechter foto van de bovenstaande afbeelding. Op deze manier reduceert u de lengte van de massa-verbinding van de probe tot een absoluut minimum, maar uiteraard kunt u dit niet voor alle metingen toepassen. Er moet toevallig een massa-punt zo dicht in de buurt van het meetpunt op de print aanwezig zijn! In de onderstaande foto ziet u zo'n bayonet style groundlead in detail. Die veertjes zijn los te koop voor belachelijk hoge prijzen. Bij DigiKey betaalt u er.... € 9,43 per stuk voor en bij AliExpress slechts € 2,56 voor vijf stuks. Tip voor het zoeken via Google: soms worden deze veertjes ook '*oscilloscope probe ground spring*' genoemd.



Een 'oscilloscope probe ground spring' op de punt van een 1/10-probe.
(© 2025 Jos Verstraten)

Zo'n kort veertje zorgt ervoor dat de voorflank van een puls vrijwel zonder vervorming, toegevoegde oscillaties of overshoot op het scherm van uw oscilloscoop verschijnt. In de onderstaande figuur ziet u links de weergave van de voorflank van een zeer steile puls met een probe met een zo kort mogelijke sprunghook groundlead en rechts met een oscilloscope probe ground spring.



Vergelijking van de weergave van de voorflank van een zeer steile puls.
(© 2009 meettechniek.info)

Meetfouten die bij alle metingen kunnen optreden

Meetfouten door EMI/RFI-interferentie

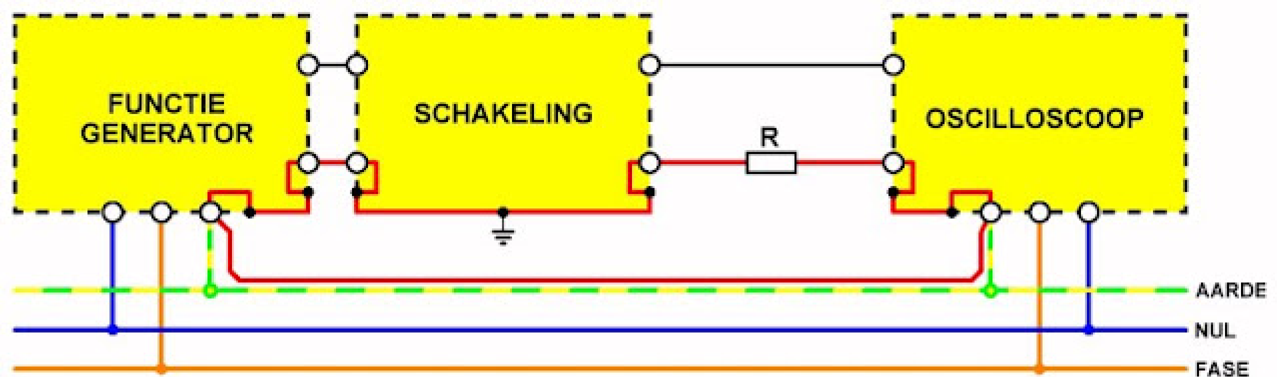
Elektromagnetische interferentie (EMI) en radiofrequente interferentie (RFI) kunnen de nauwkeurigheid van uw metingen sterk beïnvloeden. Zeker in deze tijd waarin ieder huis en dus ook uw hobbykamer vol staat met geschakelde voedingen, domotica-kastjes, LED-dimmers en WiFi- en Bluetooth-apparatuur is het zo goed als onmogelijk instraling van HF-stoorspanningen in uw meetopstelling volledig te voorkomen. U kunt die effecten echter wél minimaliseren door:

- gebruik te maken van goede afgeschermde meetkabels
- te zorgen voor een enkel aardingspunt voor alle meetapparatuur
- eventueel ferrietkralen rond meetkabels aan te brengen
- zoveel mogelijke storingsbronnen tijdens de meting uit te schakelen
- bij oscilloskoop metingen de optie '*averaging*' in te schakelen
- alle meetkabels zo kort mogelijk te houden
- niet-afgeschermde lange kabels te twisten

Meetfouten als gevolg van aardlussen

Als uw meetapparatuur netgevoed is en de metalen behuizingen geaard zijn ontstaan heel gemakkelijk aardlussen. De massa van uw meetapparatuur hangt dan immers ook via het metalen chassis aan de aarde. Er ontstaat dan een aardlus tussen de massa-verbindingen in uw meetopstelling en de aarde-verbindingen via de geaarde wandcontactdozen. Dit is in het rood voorgesteld in de onderstaande figuur. De weerstand R vertegenwoordigt de verbindings- en bedradingsweerstanden in het systeem. Door zo'n massalus kan een stroom

gaan vloeien vanwege allerlei kleine spanningsverschillen tussen de divere massa's in de meetopstelling. Omdat R klein is, kan de stroom best wel een hoge waarde bereiken. Deze stroom wekt over de weerstand R een spanning op waarvan de grootte, de vorm en het frequentiebereik niet te voorspellen zijn. Maar die spanning staat wél is serie met de spanning die de te meten schakeling aan de oscilloscoop levert. Op het scherm van uw oscilloscoop ontstaat dus een beeld dat verontreinigd is door de aardlus-spanning.



Het ontstaan van een aardlus. (© 2025 Jos Verstraten)

Dit soort fouten kunt u vermijden door:
- het gebruik één enkel aardpunt (single-point grounding)
- het gebruik van geïsoleerde meetinstrumenten
- het gebruik van een scheidingstrafo voor het voeden van uw oscilloscoop
- het gebruik van batterijgevoede apparatuur
- kabels kort te houden en ver van de stroomkabels te leggen

Meetfouten door common-mode spanningen
Common-mode spanningen zijn spanningen die tegelijkertijd op beide ingangen van een meetapparaat voorkomen ten opzichte van de massa. Uw oscilloscoop heeft een maximale hoeveel common-mode spanning die kan worden onderdrukt. Dit wordt de '*CMRR*' of '***C****ommon-****M****ode* ***R****ejection* ***R****atio*' genoemd. Deze grootheid wordt altijd uitgedrukt als een aantal dB bij een bepaalde frequentie. Dat getal geeft de verhouding tussen de versterking van het verschilsignaal (differentiële versterking) en de versterking van het common-mode signaal:
$CMRR = 20 \cdot \log_{10} [A_{diff} / A_{cm}]$
A_{diff}: versterking van het verschilsignaal
A_{cm}: versterking van het common-mode signaal
Stel dat er een common-mode storing van 10 V aanwezig is op beide ingangen van uw oscilloscoop en stel dat deze een CMRR heeft van 80 dB.
Dat betekent een verhouding van:
$A_{diff} / A_{cm} = 10^{(80/20)}$
$= 10^4$
$= 10.000$
Het common-mode signaal wordt dus 10.000 keer verzwakt. Dan wordt die 10 V common-mode storing door uw oscilloscoop onderdrukt tot 1 mV.
Als de common-mode spanning op de ingang van de oscilloscoop echter te hoog is kan leiden tot onnauwkeurige metingen of zelfs beschadiging van het apparaat (doorslag van condensatoren!).

Meetfouten door het tribo-elektrisch effect
Het tribo-elektrisch effect is het verschijnsel waarbij bepaalde materialen elektrische lading verkrijgen nadat ze met een ander materiaal in contact zijn gekomen en vervolgens weer van elkaar worden gescheiden. In kabels kan dit effect optreden als een kabel opeens wordt gebogen onder een kleine hoek of als een kabel onderhevig is aan sterke mechanische trillingen. Het koper van de geleidende ader maakt dan steeds op een andere manier contact met het materiaal van de isolatie en dat kan tribo-elektrische ladingsverschillen veroorzaken. Dat fenomeen uit zich onder de vorm van spanningen in het mV-bereik. Bij zeer gevoelige

metingen kunnen sommige onverklaarbare stoorspanningen aan dit effect worden toegeschreven.

Meetfouten door het thermo-elektrische effect
Een verbinding tussen twee verschillende metalen zal altijd een thermo-elektrische spanning genereren. De grootte van die spanning is afhankelijk van de zogenaamde seebeck-coëfficiënten S van beide metalen. Die grootheid wordt uitgedrukt in µV/°K. Het zal dus wel duidelijk zijn dat ook de temperauur een belangrijke rol speelt. De grootte van de thermo-elektrische spanning wordt gegeven door de formule:
$U_S = [S_1 - S_2] \cdot T$ [eenheid is µV]
Hierin staan:
S_1 voor de seebeck-coëfficiënt van metaal 1
S_2 voor de seebeck-coëfficiënt van metaal 2
T voor de temperatuur in graden kelvin
Om de temperatuur in °K te berekenen moet u 273 optellen bij de temperatuur in °C.
Het metaal met de grootste seebeck-coëfficiënt is tellurium met een waarde van 570 µV/°K.
Constantaan heeft de kleinste waarde met 36 µV/°K.
Dit effect genereert zeer kleine foutspanningen bij uw metingen. Als u bijvoorbeeld een vergulde meetstift tegen een tinnen soldeerklodder op een printplaat houdt die op een temperatuur staat van 100 °C (bijvoorbeeld de soldering van een vermogenstransistor) zal die verbinding een foutspanning van 0,9325 mV genereren.

Meetfouten door elektrochemische effecten
Naast het thermo-elektrische effect kunnen er ook elektrochemische effecten ontstaan als u twee verschillende metalen in met elkaar in contact brengt. Dat is bijvoorbeeld het geval als u een vervuilde en vochtige banaanstekker in een connector van uw multimeter plugt. Ook die spanningen liggen in het mV-bereik en kunnen gevoelige metingen aan bijvoorbeeld sensoren verstoren.
Zorg er dus steeds voor dat alle stekkers en contactbussen schoon, droog en vrij van oxidatie zijn.

Meetfouten door gereflecteerde stoorsignalen
Gereflecteerde stoorsignalen zijn spanningen die vanuit uw meetapparatuur doordringen tot de schakeling waarin u meet en door interferentie met de te meten spanning de grootte van deze spanning beïnvloeden. In meetapparatuur zijn drie bronnen aan te wijzen die verantwoordelijk kunnen zijn voor het genereren van dit soort signalen:

- De ingangsschakeling:
  Die is meestal samengesteld uit een analoge versterker waaruit een offsetstroom naar de buitenwereld kan ontsnappen. Een eenvoudige methode om te onderzoeken of een multimeter daar last van heeft is het apparaat op de gevoeligste gelijkspanningsstand te schakelen en de uitlezing met kortgesloten en met een weerstand van 10 MΩ belaste aansluitklemmen te vergelijken. In principe moet de uitlezing in beide gevallen identiek zijn. Bestaat er een spanningsverschil van enige tientallen mV, dan kunt u er zeker van zijn dat de multimeter een stroom naar de te meten schakeling stuurt en dat dus meetfouten kunnen ontstaan.
- De digitale schakelingen:
  Er kunnen zeer snelle puls-residuen via parasitaire capaciteiten doordringen tot de ingangsklemmen en dus ook tot de schakeling waarin gemeten wordt. Aan dit soort storingen is in feite niets te verhelpen!
- De voedingsschakeling:
  Er zijn in de voeding van de meter parasitaire capaciteiten aanwezig tussen het primaire en het secundaire deel, waardoor er restanten van de schakelfrequentie ontstaan tussen de aarde en de massa van het apparaat. Deze dringen door tot de meetingang en vervormen het beeld op het scherm van uw oscilloscoop.